

Zum Frostwiderstand gefügedichter Betone mit geringen Wasserzementwerten

von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Volkert Feldrappe
aus Dessau

Eingereicht am	01. September 2005
Mündliche Prüfung am	17. Februar 2006
Berichter	Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann Prof. Dr.-Ing. G. Thielen
Prüfer	Prof. Dr.-Ing. K. P. Grosskurth

(Braunschweig 2006)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde in den Jahren 1999 bis 2003 im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf durchgeführt. Dem Verein Deutscher Zementwerke e. V. und seiner Geschäftsführung danke ich für die Förderung der Arbeit und die Möglichkeit, die Ergebnisse der Untersuchungen für eine Dissertation zu nutzen.

Die Dissertation wurde betreut von Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Thielen. Ihm sowie Frau Dr.-Ing. E. Schäfer, Herrn Dr.-Ing. E. Siebel sowie Herrn Dr.-Ing. J. Rickert gilt mein Dank für die wertvollen Diskussionen sowie die Unterstützung bei der Konzeption der Arbeit und der Durchführung der Untersuchungen. Daneben gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann, Technische Universität Braunschweig, für sein Interesse an der Arbeit und die wertvollen Anregungen bei der Abfassung der Dissertationsschrift.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Forschungsinstituts, insbesondere denen der Abteilungen Betontechnik und Zementchemie, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich für ihre Diskussionsbereitschaft und ihre Hilfe bei der Versuchsdurchführung.

Mein Dank gilt auch Frau P. Schroeder, RWTH Aachen und Deutsches Institut für Bautechnik sowie Herrn Prof. Dr. H. A. Mayer, Universität Tübingen und Herrn Dr.-Ing. F. Weise, Bundesanstalt für Materialprüfung und –forschung für ihre Hilfe bei der Durchführung der MRE-Untersuchungen, der NMR-Spektroskopie bzw. der 3D-Computertomographie.

Der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. „Otto von Guericke“ (AiF) sei für die Finanzierung eines Teils der Arbeit mit Forschungsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit gedankt.

Düsseldorf, August 2005

Volkert Feldrappe

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Forschungsansatz und Zielsetzung	2
2.1	Forschungsansatz	2
2.2	Zielsetzung	2
3	Stand der Erkenntnisse	4
3.1	Hochfester Beton	4
3.1.1	Historischer Abriss	4
3.1.2	Zusammensetzung und Erhärtung	5
3.1.3	Mechanische Eigenschaften	7
3.1.4	Dauerhaftigkeit	9
3.2	Frostschädigungsmechanismen	10
3.2.1	Schadensbild und Schadensfeststellung	10
3.2.2	Einflüsse auf den Frostwiderstand	12
3.2.2.1	Porensystem	12
3.2.2.2	Gefrierverhalten der Porenlösung	14
3.2.3	Schädigungsmechanismen	17
3.2.3.1	Allgemeines	17
3.2.3.2	Thermisch bedingte Spannungen	17
3.2.3.3	Hydraulischer Druck und Eisdruck	18
3.2.3.4	Kapillarer Effekt	19
3.2.3.5	Kritische Sättigung	19
3.2.3.6	Thermodynamisches Modell	20
3.3	Frostwiderstand hochfester Betone	22
3.3.1	Laboruntersuchungen	22
3.3.2	Mikrorissneigung	25
3.3.3	Übertragbarkeit auf Praxisverhältnisse	26
3.4	Beeinflussung des Frostwiderstands durch Silikastaub	28
3.4.1	Einfluss des Silikastaubs auf die Gefügeausbildung	28
3.4.2	Einfluss des Silikastaubs auf den Wasserhaushalt	30
3.4.3	Einfluss des Silikastaubs auf die Reaktionsprodukte	31

4 Versuchsdurchführung	33
4.1 Ausgangsstoffe	33
4.1.1 Zement	33
4.1.2 Silikastaub	33
4.1.3 Gesteinskörnung	34
4.1.4 Zusatzmittel	34
4.1.5 Zugabewasser	34
4.2 Zusammensetzung, Herstellung und Lagerung	34
4.2.1 Beton	34
4.2.2 Mörtel	36
4.2.3 Zementleim	37
4.3 Angewendete Untersuchungsmethoden und Prüfverfahren	37
4.3.1 Frischbetonprüfungen	37
4.3.2 Festigkeitsprüfungen	38
4.3.3 Prüfung des Frostwiderstands	38
4.3.4 Gefügeuntersuchungen	40
4.3.4.1 Mechanische Kenngrößen	40
4.3.4.2 Optische Analyse an Dünnschliffen	40
4.3.4.3 Mikroskopische Luftporenbestimmung	41
4.3.4.4 Gesamtporosität	41
4.3.4.5 Quecksilberdruckporosimetrie	42
4.3.5 Untersuchungen zum Wassergehalt und zur Wasserbindung	42
4.3.5.1 Bestimmung des physikalisch gebundenen Wassers	42
4.3.5.2 Bestimmung des chemisch gebundenen Wassers	43
4.3.5.3 Bestimmung der Feuchtigkeitsverteilung mittels Multi-Ring-Elektrode	44
4.3.5.4 Bestimmung der Feuchtigkeitsverteilung mittels dreidimensionaler Computertomographie	45
4.3.6 Untersuchungen zum Reaktionsverhalten des Silikastaubs	46
4.3.6.1 Abstoppen der Hydratation	46
4.3.6.2 Simultane Thermoanalyse (STA)	47
4.3.6.3 Bestimmung des Anteils reagierten Silikastaubs	48
4.3.6.4 Rasterelektronenmikroskopie	48
4.3.6.5 Nuclear Magnetic Resonance Spektroskopie (NMR-Spektroskopie)	49

5	Darstellung und Erörterung der Untersuchungsergebnisse	51
5.1	Frischbetoneigenschaften	51
5.2	Festigkeits- und Verformungseigenschaften	51
5.3	Frostwiderstand	52
5.3.1	<i>CIF-Verfahren</i>	52
5.3.2	<i>Balkenverfahren</i>	56
5.3.3	<i>Zusammenfassung</i>	57
5.4	Bedeutung des relativen dynamischen E-Moduls zur Charakterisierung des Gefüges	58
5.4.1	<i>Festigkeitsparameter</i>	58
5.4.2	<i>Dünnschliffe</i>	60
5.4.3	<i>Dreidimensionale Computertomographie</i>	61
5.4.4	<i>Porosität</i>	62
5.4.5	<i>Zusammenfassung</i>	64
5.5	Einflüsse des Gefüges auf den Frostwiderstand	65
5.5.1	<i>Festigkeitsparameter</i>	65
5.5.2	<i>Porosität</i>	66
5.5.2.1	<i>Luftporenkennwerte</i>	66
5.5.2.2	<i>Gesamtporosität</i>	68
5.5.2.3	<i>Poroneingangsradiusverteilung</i>	72
5.5.2.4	<i>Einfluss des Silikastaubgehalts auf die Porosität</i>	77
5.5.2.5	<i>Einfluss der Lagerung auf die Porosität des oberflächennahen Bereichs</i>	78
5.5.2.6	<i>Grenzradius</i>	79
5.5.3	<i>Mikrorissneigung</i>	81
5.5.4	<i>Zusammenfassung</i>	84
5.6	Einflüsse des Feuchtigkeitshaushaltes auf den Frostwiderstand	85
5.6.1	<i>Feuchtigkeitsverteilung</i>	85
5.6.1.1	<i>Multi-Ring-Elektrode</i>	85
5.6.1.2	<i>3D-Computertomographie</i>	88
5.6.2	<i>Wassergehalt</i>	92
5.6.2.1	<i>Physikalisch gebundenes Wasser</i>	92
5.6.2.2	<i>Chemisch gebundenes Wasser</i>	94
5.6.3	<i>Zusammenfassung</i>	95
5.7	Einfluss des Porenfüllungsgrades auf den Frostwiderstand	96

5.8 Einfluss der Zementhydratation und der Reaktion des Silikastaubs auf den Gehalt an physikalisch gebundenen Wasser	100
5.8.1 Unhydratisierter Zement bzw. Zement und Silikastaub	100
5.8.2 Hydratation des Zements	102
5.8.3 Reaktionsverhalten des Silikastaubs	105
5.8.4 Stöchiometrie der CSH-Phasen	107
5.8.5 Zusammenfassung	110
6 Qualitatives Modell zur Beschreibung des Frostwiderstands von dichten hochfesten Betonen	111
6.1 Beschreibung des Modells	111
6.1.1 Allgemeines	111
6.1.2 1. Phase: Feuchtigkeitsgehalt und Porenfüllung während der Erhärtung	112
6.1.3 2. Phase: Wiederbefeuchtung – Kapillare Wasseraufnahme	113
6.1.4 3. Phase: Frost-Tau-Wechsel – Wasserumlagerung im Gefüge und zusätzliche Wasseraufnahme durch „Frostpumpe“	114
6.1.5 4. Phase: Schädigung – Überschreiten der kritischen Sättigung	115
6.2 Vorschlag zur verkürzten Prüfung des Frostwiderstands dichter hochfester Betone	116
6.3 Validation mit zusätzlichen Untersuchungen	117
6.3.1 Frisch- und Festbetonparameter	117
6.3.2 Frostwiderstand	117
6.3.3 Relativer Porenfüllungsgrad	119
7 Zusammenfassung	121
8 Literaturverzeichnis	125
9 Normenverzeichnis	139
10 Anhang	142

Verwendete Abkürzungen

(w/z) _{eq}	Äquivalenter Wasserzementwert
3D-CT	Dreidimensionale Computertomographie
C/S	Molares Verhältnis von Calcium zu Silicium
CIF	Capillary Suchtion – Internal damage and Freeze- thaw
CSH	Calciumsilikathydrat
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie (<i>Differential Scanning Calorimetry</i>)
DTA	Differenz-Thermoanalyse
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (<i>Energy-Dispersive X-Ray Diffraction</i>)
E _{dyn}	Dynamischer E-Modul
ESEM	Atmosphärisches Rasterelektronenmikroskop (<i>Environmental Scanning Electron Microscopy</i>)
E _{stat}	Statischer E-Modul
EW	Einwaage
FM	Fließmittel
FTW	Frost-Tau-Wechsel
Hg-Porosität	Porosität bestimmt mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie
KL	Kantenlänge eines Würfels
L	Abstandsfaktor
MRE	Multi-Ring-Elektrode
mS	mit Silikastaub
MSS	Methanol, Salz- und Salicylsäure
NMR	Magnetische Kernresonanzspektroskopie (<i>Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy</i>)
oS	ohne Silikastaub
RDM	Relativer dynamischer E-Modul
RPFG	Relativer Porenfüllungsgrad
s	Silikastaub
STA	Simultane Thermoanalyse
t	Zeit
z	Zement

Verwendete Formelzeichen

A_{300}	Mikroluftporengehalt
A_r	Reagierter Anteil des Silikastaubs
c_{10}	Verdichtungsmaß 10 min nach Mischende
d	Schichtdicke des zu durchstrahlenden Stoffes bei der NMR Spektroskopie
d_{10}	Ausbreitmaß 10 min nach Mischende
$f_{cm,28}$	Würfeldruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen
$f_{ct,BZ}$	Biegezugfestigkeit
$f_{ct,sp}$	Spaltzugfestigkeit
I	Intensität der Strahlung
k	Anrechnungsfaktor des Zusatzstoffs auf den Wasserzementwert
w_{15MPa}	Gesamtporosität
w_{28}	Feuchtegehalt im Alter von 28 Tagen
w_{cap}	Kapillare Wasseraufnahme
w_n	Gesamtfeuchtegehalt
α	Hydrataionsgrad des Zements
δ	chemische Verschiebung bei der NMR Spektroskopie
μ	chemisches Potential bzw. Gibbssches Potential
μ	materialspezifischer Absorptionskoeffizient (3D-CT)

1 Einleitung

Betonbauwerke müssen während ihrer gesamten Lebensdauer einen ausreichenden Widerstand gegenüber Umwelteinflüssen aufweisen. Hierzu gehört neben der Widerstandsfähigkeit gegenüber betonangreifenden Medien, wie z. B. sulfathaltigen Böden und Wässern, auch der Widerstand gegenüber einem Frostangriff.

Schon die Römer erkannten die Bedeutung des Frostwiderstands, um dauerhafte Bauwerke zu errichten [Lam 93]. Mit Beginn der modernen Betontechnologie Ende des 18. und Anfang des 19. Jahrhunderts erschien die Erforschung der Einflüsse auf den Frostwiderstand von Betonen notwendig. Insbesondere die Fragestellung hinsichtlich des Einflusses von „Zusätzen“, wie z. B. gefällter Kieselsäure wurde kontrovers diskutiert [Büs 05]. Die derzeit gültigen Regelwerke DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 enthalten für solche Betone, die einem Frostangriff ausgesetzt sind, Anforderungen an die Ausgangsstoffe (z. B. Zementart, Art der Gesteinskörnung) und an die Zusammensetzung (z. B. Wasserzementwert und Luftgehalt des Frischbetons). Diese betontechnischen Vorgaben beruhen auf langjährigen Erfahrungen im Betonbau mit i. d. R. normalfesten Betonen. Sie lassen bei sachgerechter Verarbeitung und Nachbehandlung einen hohen Frostwiderstand dieser Betone erwarten.

Mit hochfesten Konstruktionsbetonen, die wiederholten Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt sind, liegen dagegen deutlich weniger praktische Erfahrungen vor. Aufgrund ihrer Zusammensetzung wird jedoch ein den normalfesten Betonen vergleichbares, auf keinen Fall schlechteres Verhalten vorausgesetzt. Laboruntersuchungen sowohl zum Frost- aber auch zum Frost-Tausalz-Widerstand hochfester Betone ohne künstlich eingeführte Luftporen lieferten jedoch insbesondere bei reiner Frostbeanspruchung z. T. widersprüchliche Ergebnisse [Ham 91, Gus 94, Pig 95]. Dabei wurde speziell das Gefüge hochfester Betone mit Silikastaub und einem äquivalenten Wasserzementwert $\geq 0,35$ durch die wiederholten Frost-Tau-Wechsel geschädigt [Utg 04, Fel 04a, Pal 04]. Die Ursachen für das beobachtete Materialverhalten konnten nicht abschließend geklärt werden. Der Kenntnisstand über die Dauerhaftigkeit von Hochleistungsbetonen mit äquivalenten Wasserzementwerten $\leq 0,40$ hinsichtlich eines Frostangriffs ist nicht ausreichend, um die Auswirkungen und Zusammenhänge einer Frostschädigung differenziert und zielsicher beschreiben zu können.

2 Forschungsansatz und Zielsetzung

2.1 Forschungsansatz

Obwohl die komplexen Wirkmechanismen bei einer Frostbeanspruchung in verschiedenen Modellen formuliert sind, können derzeit die Ursachen für einen Frostschaden silikastaubhaltiger hochfester Betone noch nicht präzise beschrieben und vorhergesagt werden. Werden die verschiedenen Modelle und die Ergebnisse zum Frostwiderstand hochfester Betone analysiert, ist festzustellen, dass hauptsächlich physikalische Vorgänge einen Schaden infolge eines Frostangriffs bewirken. Das bedeutet, dass, wie in Bild 2-1 dargestellt, Unterschiede im Frostwiderstand auf die wesentlichen Einflussgrößen Gefügebildung und Feuchtigkeitshaushalt sowie die Sättigung des Gefüges zurückzuführen sind. In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb der Einfluss des Silikastaubeinsatzes auf die Ausbildung des Gefüges, auf den Feuchtigkeitshaushalt sowie auf eine veränderte Zusammensetzung der Hydratationsprodukte infolge der puzzolanischen Reaktion untersucht und in Beziehung zu dem Frostwiderstand der hochfesten Betone gebracht.

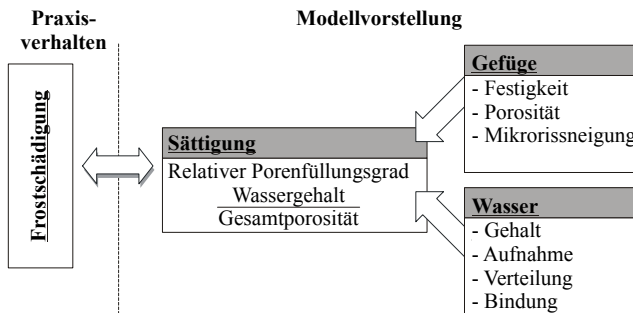


Bild 2-1: Forschungsansatz

2.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es, den Erkenntnisstand zum Verhalten hochfester Betone ohne künstlich eingeführte Luftporen bei einer wiederholten Frostbeanspruchung zu erweitern, um die Auswirkungen und Zusammenhänge einer Frostschädigung differenziert und zielsicher beschreiben zu können. Dabei gilt ein besonderes Interesse dem Einfluss des Silikastaubes auf den Frostwiderstand dieser Betone.

Die Umsetzung erfolgt mit Betonversuchen im Labormaßstab. Um spezielle Detailfragen beantworten zu können, werden zusätzlich einige Mörtel- bzw. Zementleime untersucht. Einflüsse durch die Probenaufbereitung oder durch unterschiedliche Gehalte an Gesteinskörnungen in den Proben können dadurch minimiert werden. Entsprechend dem in Bild 2-1 dargestellten Forschungsansatz müssen folgende Aufgabenstellungen bearbeitet werden.

- ❑ Um die beobachteten Unterschiede der hochfesten Betone im Frostversuch beurteilen und erklären zu können, müssen das Gefüge und der Feuchtigkeitshaushalt systematisch untersucht werden. Hierfür werden gezielt der Einfluss der Festigkeit, die Bildung von Mikrorissen und die Porosität des Gefüges verschiedener Betonzusammensetzungen auf den Frostwiderstand beurteilt. Ferner ist die Beschreibung der Porosität hinsichtlich der verschiedenen Kennwerte wie Gesamtporosität, Porengrößenverteilung oder Grenzradius notwendig. Korrelationen zwischen der in den Frostversuchen bestimmten Änderung des relativen dynamischen E-Moduls und anderer Betoneigenschaften wie Festigkeits- und Verformungseigenschaften sowie Porosität werden ermittelt, um die Bedeutung der einzelnen Kenngrößen hinsichtlich des Frostwiderstands abschätzen zu können.
- ❑ Neben der Porosität des Gefüges ist die Menge und die Bindung der Feuchtigkeit sowie deren Verteilung innerhalb der Probekörper von Bedeutung. Deshalb ist mit gravimetrischen Verfahren die Menge und die Bindungsart der Feuchtigkeit an den Betonen zu verschiedenen Zeitpunkten zu bestimmen. Neuartige zerstörungsfreie Prüfverfahren sind anzuwenden, um die Feuchtigkeitsverteilung während der Prüfung zu visualisieren und um zusätzliche Aussagen über das gefrierbare Wasser im Betongefüge zu erhalten.
- ❑ Da vielfach in der Literatur von Schäden infolge eines Frostangriffs bei der Laborprüfung aber auch in der Praxis an hochfesten Betonen mit Silikastaub berichtet wird, ist der Einfluss des Silikastaubs auf den Frostwiderstand dichter hochfester Betone zu klären. Insbesondere ist die Rolle der puzzolanischen Reaktion aber auch die Umsetzung des Silikastaubs bei der Erhärtung des Betons zu untersuchen.

Der Stand der Erkenntnisse und die zur Bearbeitung des Themas benötigten Grundlagen werden nachfolgend detailliert dargestellt.

3 Stand der Erkenntnisse

3.1 Hochfester Beton

3.1.1 Historischer Abriss

Die Entwicklung von Betonen mit immer höheren Druckfestigkeiten war von je her das Ziel von Betontechnologen. Schon in den zwanziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts wurde die Bezeichnung „hochfester Beton“ eingeführt [Bau 29, Tow 32]. Durch den Fortschritt der Betontechnologie, der z. B. durch die Entwicklung und Optimierung von Betonzusatzmitteln oder den Einsatz von Betonzusatzstoffen wie Silikastaub gekennzeichnet war, veränderten sich die Anforderungen, ab denen ein Beton das Attribut „hochfest“ erhielt. Mit Einführung der deutschen Regelwerke DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2001-07 ist ein Beton mit einer Druckfestigkeitsklasse $> C50/60$ als hochfest definiert.



Bild 3-1: Japancenter, Taunustor 2, Frankfurt/Main; Hochfester Beton der Festigkeitsklasse C90/105 aus [Jap 96]

Auf Grund der hohen Festigkeiten ist der Einsatz von hochfestem Beton vor allem für hochbelastete Druckglieder vorteilhaft, um Druckbewehrung einzusparen und Bauteilquerschnitte zu vermindern. So kommen weltweit hochfeste Betone in modernen Hochhäusern, Offshore-Bauwerken oder Brücken, wie z. B. der Großen Belt Brücke zum Einsatz. In Deutschland wurden z. B. das Japan-Center (Bild 3-1), die Hochhäuser Kastor und Pollux in Frankfurt oder der Post-Tower in Bonn aber auch z. B. die Muldebrücke bei Glauchau aus hochfestem Beton mit einer Druckfestigkeitsklasse von bis zu C90/105 errichtet.

Hochfester Beton findet jedoch nicht nur wegen seiner gegenüber normalfestem Beton höheren Festigkeit verstärkt Anwendung. Er ist auch wegen seiner weiteren Eigenschaften im Hinblick auf hochwertige und vor allem dauerhafte Bauwerke von Interesse. Dichte, Undurchlässigkeit und der Widerstand gegenüber chemischer und mechanischer Beanspruchung sind besonders hoch. Als Beispiel sei an dieser Stelle der Kühlturm des Kraftwerkes Niederaußem genannt, der aus einem bezüglich eines Säureangriffs optimierten hochfesten Beton hergestellt wurde [Hüt 00].

3.1.2 *Zusammensetzung und Erhärtung*

Die Eigenschaften hochfester Betone werden über die Menge und die Qualität der Betonausgangsstoffe beeinflusst. In der Regel werden hochfeste Betone mit einem höheren Zementgehalt hergestellt, der in der Größenordnung zwischen 380 kg/m^3 und 450 kg/m^3 liegt. Weitere Voraussetzungen zur Herstellung hochfester Betone sind die Reduktion des Wasserzementwertes, der Einsatz von Silikastaub als Füller und puzzolanisch reaktiver Zusatzstoff sowie die Zugabe von hochwirksamen Fließmitteln, um die Verarbeitbarkeit zu gewährleisten [Hub 93].

Der Wasseranspruch einer Betonmischung nimmt infolge der sehr hohen spezifischen Oberfläche des Silikastaubs zu [Wes 85]. Nach Malhotra [Mal 83] stieg der Wasseranspruch eines Zementleims erst bei einem Austausch von 3 M.-% Silikastaub bezogen auf das Zementgewicht signifikant an (Bild 3-2). In der praktischen Anwendung wird diese Wirkung mit Betonverflüssigern oder Fließmitteln ausgeglichen. Das Erstarren von silikastaubhaltigem Beton, dementsprechend auch hochfestem Beton, ist mit dem von normalfestem Beton ohne Silikastaub generell vergleichbar [Maa 92]. Wenn die deutlich kleineren Silikastaubpartikel als Keimbildner fungieren, kann die Hydratation u. U. etwas beschleunigt werden.

Die Hydratation des Zements und der einzelnen Klinkerphasen ist in der Literatur vielfach beschrieben. Die Literatur wurde in [Ric 04] ausführlich zusammengefasst. Die Festigkeitsbildung des Zements beruht demnach auf der Reaktion der silikatischen Klinkerhauptbestandteile C_3S und C_2S mit Wasser zu Calciumsilikathydraten, den CSH-Phasen. Diese dringen in den wassergefüllten Zwischenraum der Partikel vor. Auf Grund ihrer Größe von einigen Nanometern werden sie als Zementgel bezeichnet. Da die CSH-Phasen im Vergleich zu den Klinkerbestandteilen an Calciumoxid (CaO) ärmer sind, bildet sich bei der Hydratation neben den CSH-Phasen Calciumhydroxid (Ca(OH)_2). Für eine vollständige Hydratation werden bezogen auf den Zement rd. 40 M.-% Wasser benötigt. Dabei sind ca. 25 bis 28 M.-% Wasser chemisch in den Hydratations-

produkten und 12 bis 15 M.-% physikalisch in den Gelporen gebunden. Bei hochfesten Betonen, die i. d. R. mit Wasserzementwerten $\leq 0,40$ hergestellt werden, kann nicht der gesamte Zement vollständig hydratisieren. Es verbleiben Reste von unreaktiertem Zement in der Mitte der Zementkörner.

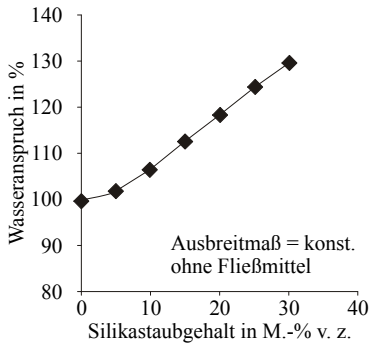


Bild 3-2: Wasseranspruch von Zementleim in Abhängigkeit vom Silikastaubgehalt bezogen auf die Referenzmischung ohne Silikastaub [Mal 83]

Bild 3-3 veranschaulicht, dass eine vollständige Hydratation des Zements nicht zwingend notwendig ist, um eine maximale Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit zu erreichen [Loc 76]. Richter nennt als Gründe hierfür eine hohe Eigenfestigkeit der unhydratisierten Zementkörner, einen praktisch kapillarporenfreien Zementstein sowie einen innigen Verbund der Klinkerpartikel durch die Hydratationsprodukte [Ric 99a].

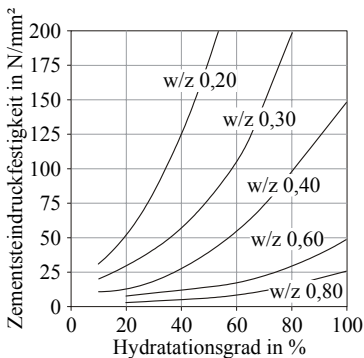


Bild 3-3: Einfluss des Wasserzementwertes und des Hydratationsgrades auf die Zementsteindruckfestigkeit [Loc 76]

Der in hochfesten Betonen zum Einsatz kommende Silikastaub besteht hauptsächlich aus amorpher Kieselsäure. Als reaktives Puzzolan reagiert er mit dem aus der Hydratation der Klinkerbestandteile gebildeten Calciumhydroxid entsprechend Gleichung 3-1 zu festigkeitsbildenden Calciumsilikathydraten. Die Eigenschaften der durch die puzzolanischen Reaktion neugebildeten CSH-

Phasen sind nach allgemeiner Auffassung vergleichbar mit denen der Zementhydratation und wirken festigkeitssteigernd.



Gleichung 3-1

Die Frischbetonrohddichte von hochfestem Beton liegt in der Größenordnung von normalfestem Beton, wenn dieser eine verarbeitungsgerechte Konsistenz aufweist und ausreichend verdichtet ist. Die Porosität im Festbeton hängt ganz wesentlich vom Wasserzementwert ab (siehe Abschnitt 3.2.2.1). Da hochfeste Betone mit Wasserzementwerten $\leq 0,40$ hergestellt werden, weisen sie prinzipiell eine geringe Porosität auf. Die Porenanteile verschieben sich von den Kapillarporen zu den Gelporen [Alt 90, Gus 98]. Dieser Einfluss wird zusätzlich durch den Einsatz von Silikastaub verstärkt.

3.1.3 Mechanische Eigenschaften

Die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften hochfester Betone gegenüber normalfesten Betonen erfolgt fließend. Dabei resultiert die Steigerung der Festigkeit aus einer Anpassung der Matrixfestigkeit an die Festigkeit der Gesteinskörnung. Gleichzeitig wird der Verbund zwischen Matrix und Gesteinskörnung, die s. g. Kontaktzone, verbessert.

Die Kontaktzone eines Betons ist durch eine gegenüber der Matrix höhere Porosität gekennzeichnet, da das Zuwachsen des Porenraums mit Hydratationsprodukten, wie in Bild 3-4 schematisch dargestellt, nur von den reaktiven Partikeln und nicht von der Gesteinskörnung aus erfolgen kann. In ihren Poren scheiden sich vorzugsweise Calciumhydroxidkristalle ab. Die Kontaktzone ist bei einer mechanischen Beanspruchung wegen der höheren Porosität und der gegenüber den CSH-Phasen geringeren Festigkeit der Ca(OH)_2 -Kristalle eine Schwachstelle im Beton. Durch den Einsatz des wesentlich feineren Silikastaubs und durch seine puzzolanische Reaktivität werden die Porenradien der Kontaktzone verkleinert [Tre 80, Fel 86, Sar 87, Scr 88, Rei 95]. Die Menge an Calciumhydroxid und die Größe der in den Poren der Kontaktzone abgeschiedenen Kristalle ist verringert. Deshalb ist der Einfluss der Schwachstelle „Kontaktzone“ bei hochfesten Betonen minimiert.

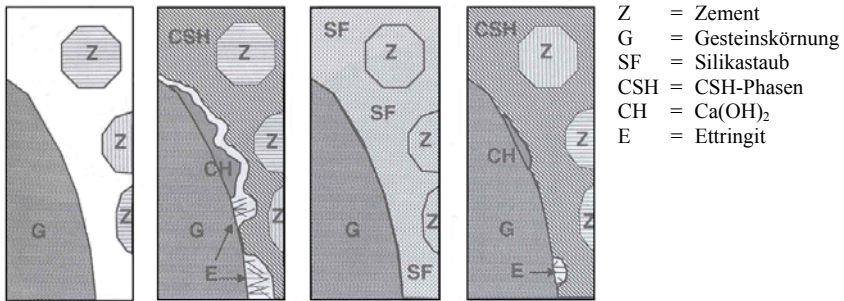


Bild 3-4: Schematisch Darstellung der Verdichtung der Kontaktzone zwischen Matrix und Gesteinskorn infolge der puzzolanischen Reaktion des Silikastaubs nach [Gol 89]

Der E-Modul hochfester Betone nimmt mit steigender Festigkeit zu. Dabei nähert sich das Verformungsverhalten hochfester Betone dem linear elastischen Verhalten an (Bild 3-5). Das bedeutet, dass das Verhalten des Betons spröder wird, aber gleichzeitig Mikrorisse erst bei einem höheren Lastniveau von ca. 60 bis 65 % der Bruchlast auftreten [Ric 99a]. Der Einfluss des Silikastaubs auf das Verformungsverhalten wird in der Literatur unterschiedlich bewertet. Während z. B. Alfes eine Vergrößerung des E-Moduls hochfester Betone durch die Zugabe von Silikastaub feststellte [Alf 89], fanden u. a. Nischer oder Heinrich et al. keinen signifikanten Einfluss des Silikastaubs auf den E-Modul [Nis 94, Hei 99].

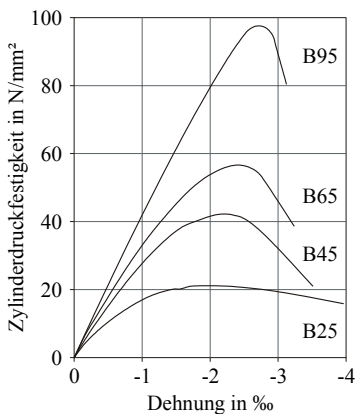


Bild 3-5: Einfluss der Festigkeit auf das Verformungsverhalten von Beton [Hel 92]

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die mechanischen Eigenschaften hochfester Betone intensiv erforscht wurden. Aus den Ergebnissen wurden von verschiedenen Wissenschaftlern anerkannte Stoffgesetze entwickelt (z. B. [Hel 90, Hel 92, Kön 98]).

3.1.4 Dauerhaftigkeit

Dauerhafte Betonbauteile und –werke weisen die geplanten Gebrauchseigenschaften, wie Standsicherheit, Wärme-, Feuchte- und Brandschutz sowie ein ästhetisches Äußeres über die gesamte Nutzungsdauer auf. Das bedingt, dass Betonbauwerke einen ausreichenden Widerstand gegenüber Umwelteinflüssen während ihrer gesamten Lebensdauer aufweisen müssen. Hierzu gehören neben der Widerstandsfähigkeit gegenüber betonangreifenden Medien, wie z. B. sulfathaltigen Böden und Wässern, auch der Widerstand gegenüber Carbonatisierung oder Frost- und Frost-Tausalz-Angriffen sowie der Schutz der Bewehrung.

Diese die Dauerhaftigkeit beeinflussenden Beanspruchungen, die durch physikalische und chemische Vorgänge Schäden im Beton verursachen können, erfordern die Anwesenheit von Gasen, Feuchtigkeit oder gelösten Stoffen. Dementsprechend hängt der Widerstand gegenüber diesen Beanspruchungen ganz maßgeblich von dem Eindringen und dem Transport dieser Medien im Beton ab. Da die Transportvorgänge im Porensystem des Betons erfolgen, ist die Porosität eine entscheidende Einflussgröße.

Eine gewissenhafte Verarbeitung und Nachbehandlung vorausgesetzt, besitzen hochfeste Betone infolge der geringen Wasserzementwerte ein dichtes porenarmes Gefüge (siehe Abschnitt 3.1.2). Durch die Verringerung der Porosität und des Kapillarporenraumes sollte die Widerstandsfähigkeit der hochfesten Betone gegenüber betonangreifenden Beanspruchungen höher sein als bei normalfesten Betonen. Vielfältige Untersuchungen bestätigten diese auf Grund der Betontechnologie getroffene Aussage. So attestierten u. a. Breit, Hillemeier et al. oder Nischer hochfesten Betonen einen hohen Säurewiderstand [Nis 94, Hüt 00 Bre 02]. Den Sulfatwiderstand hochfester Betone schätzten u. a. Hooton bzw. König als hoch ein [Hoo 93, Kön 99]. Ähnliches wird auch von dem Schutz der Bewehrung vor Korrosion berichtet. Obwohl es durch die puzzolanische Reaktion des Silikastaubs zu einem Absinken des pH-Wertes kommt [Pag 83, Gla 84, Alt 89], sank der pH-Wert der Porenlösung auch bei hohen Silikastaubgehalten von bis zu 30 M.-% niemals unter den für eine Bewehrungskorrosion kritischen Wert von 11,5 [Pag 83, Zha 91]. Die Abnahme des pH-Wertes führt prinzipiell zu einem geringeren Chloridbindevermögen des Zementsteins. Jedoch entsprach das Eindringverhalten von Chloridionen und der Gehalt an Feuchtigkeit dem von normalfestem Beton ohne Silikastaub [Pag 83, Sti 97]. Korrosionskritische Zustände wurden selbst nach längerer Lagerung nicht erreicht [Fio 89].

Für andere dauerhaftigkeitsrelevante Angriffe wird die Widerstandsfähigkeit in der Literatur unterschiedlich bewertet. Während der Einsatz von Silikastaub hinsichtlich der Carbonatisierungsneigung als positiv oder zumindest nicht

nachteilig eingeschätzt wird [Byf 85, Gus 98, Mal 00], berichteten andere Autoren von einer verstärkten Carbonatisierung infolge der Silikastaubzugabe [Yam 89, Maa 01]. Ursache hierfür könnte der trotz der geringeren Porosität verminderte Gehalt an $\text{Ca}(\text{OH})_2$ infolge der puzzolanischen Reaktion des Silikastaubs sein [Pag 83, Alt 89]. Ebenso widersprüchlich stellt sich die Meinung zum Frostwiderstand (siehe Abschnitt 3.3) bzw. Frost-Tausalz-Widerstand dar.

3.2 Frostschädigungsmechanismen

3.2.1 Schadensbild und Schadensfeststellung

Bei Schäden infolge eines Frostangriffs wird zwischen äußerer und innerer Schädigung unterschieden.

Äußere Schäden zeigen sich in Form von Oberflächenabwitterungen. Dabei werden kleine Partikel oder dünne Schichten aus der Oberfläche des Betons herausgelöst oder abgesprengt. Sie ist die am häufigsten beobachtete Schadensform des Frostangriffs, die in Verbindung mit Taumitteln in der Regel noch verstärkt wird. Bild 3-6 zeigt, dass Oberflächenabwitterungen häufig in einer lokal sehr unterschiedlichen Intensität auftreten. Eine Ursache für die bereichsweisen stark differierenden Sättigungsgrade führen Pigeon et al. darauf zurück [Pig 95], dass trotz gleicher Betonrezeptur sich in verschiedenen Mischchargen die Betoneigenschaften z. T. signifikant unterscheidenden können.



Bild 3-6: Oberflächenabwitterung an einer Mole; links Übersicht; rechts Details

Außerdem können Abplatzungen (sog. Pop-outs) über oberflächennahen Gesteinskörnern auftreten (Bild 3-7). Ihren Ursprung haben sie entweder in

einem nicht ausreichenden Verbund zwischen Gesteinskörnung und Matrix oder in nicht frostbeständigen Gesteinskörnern.

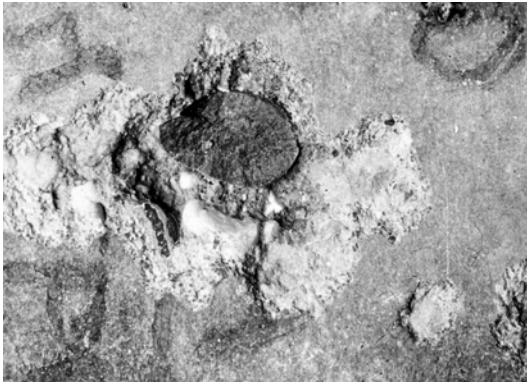


Bild 3-7: Pop-out über einem nicht frostwiderstandsfähigen Gesteinskorn

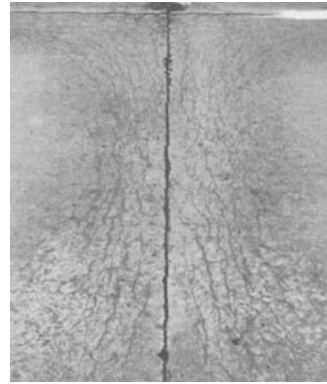


Bild 3-8: Innerer Gefügeschädigung an einer Betonfahrbahndecke [Pig 95]

Innere Gefügeschädigungen, d. h. die fortschreitende Zerstörung des tieferliegenden Betongefüges, sind zunächst optisch von außen nicht erkennbar, können jedoch z. B. mit Hilfe der Messung der Ultraschallaufzeit festgestellt werden [Hel 90, Sie 95]. Im fortgeschrittenen Schadensverlauf können, wie in Bild 3-8 dargestellt, diese Gefügeschädigungen durch Risse im Beton auch von außen sichtbar werden.

Laboruntersuchungen an Betonen ohne künstlich eingebrachte Luftporen nach reinem Frostangriff haben gezeigt, dass bei einigen Betonen ein erheblicher Abfall des dynamischen E-Moduls (= innere Schädigung) gemessen werden kann, auch wenn die Proben äußerlich intakt erscheinen und nur geringe Oberflächenabwitterungen aufweisen (z. B. [Sch 94]). Bei einer Frostbeanspruchung ohne Taumittel scheint somit in einigen Fällen keine Korrelation zwischen den Abwitterungen und der Änderung des dynamischen E-Moduls zu bestehen. Auberg schlägt daher vor, den Frostwiderstand von Beton sowohl anhand der Abwitterungen als auch mit Hilfe des relativen dynamischen E-Moduls zu beurteilen [Aub 97].

Welche Bedeutung der Abfall des dynamischen E-Moduls im Hinblick auf die zu erwartenden Eigenschaften des Betons nach einer (mehrfachen) Frostbeanspruchung hat, wurde bislang jedoch weder für Laborbetone noch im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit für Betone in der Praxis geklärt.

3.2.2 Einflüsse auf den Frostwiderstand

3.2.2.1 Porensystem

Das Porensystem des Mehrstoffsystems Beton hat grundlegende Bedeutung für den Frostwiderstand, da sich in ihm die entscheidenden Transportvorgänge abspielen. Gleichzeitig mit der Feuchtigkeitsaufnahme können Tausalze oder andere betonangreifende Stoffe in gelöster Form in den Beton gelangen. Feuchtigkeit und gelöste Stoffe wirken im Beton jedoch nicht nur auf den Frostwiderstand, sondern beeinflussen durch physikalische und chemische Vorgänge auch andere dauerhaftigkeitsrelevante Parameter wie z. B. den Widerstand gegenüber Chlorid- oder Sulfatangriff nachhaltig.

Tafel 3-1: Porengrößenverteilung und Gefrierpunkt von Beton (in Anlehnung an [Set 94])

Porenart	R_H μm	Porenfüllung	Gefrierpunkt
Grobporen	≥ 1000	Leer	0 °C bis – 20 °C
Makrokapillaren	< 1000	saugend, sofort befüllbar	
Mesokapillaren	< 30	saugend, in Minuten bis Wochen befüllbar	
Mikrokapillaren	< 1	durch kapillares Saugen nicht vollständig befüllbar	
Mesogelporen	$< 0,03$	durch Kondensation bei rel. F. 50 % - 98 % befüllbar	– 20 °C bis – 39 °C
Mikrogelporen	$< 0,001$	durch Sorption bei rel. F. < 50 % befüllbar	ca. – 90 °C

R_H : hydraulischer Radius

Im erhärteten Beton befinden sich viele unterschiedlich große Poren. Sieht man von den Verdichtungsporen bzw. Luftporen ab, können zwei grundlegend verschiedene Porenarten unterschieden werden. Zum einen sind das die durch die Hydratation des Zementes entstehenden 0,001 bis 0,01 μm großen Gelporen. Zum anderen bilden sich im Feinmörtel zwischen den Mehlkornpartikeln die größeren 0,03 bis 10 μm großen Kapillarporen. Die Unterteilung in Gel- und Kapillarporen wird in der Literatur unterschiedlich gehandhabt. Unbestritten ist, dass die Gelporosität die Poren mit einem Radius $\leq 0,01 \mu\text{m}$ umfasst. Des Weiteren wird als obere Grenze der Kapillarporosität einheitlich ein Porenradius von ca. 10 μm in der Literatur genannt. Als untere Grenze der Kapillarporen geben u. a. Powers et al. oder Wischers einen Porenradius von 0,01 μm an [Pow 46, Wis 61]. Romberg und Smolczyk et al. schlossen dagegen auf Grund systematischer Untersuchungen an Zementsteinen mit Hilfe der Quecksilber-

druckporosimetrie auf einen Radius von $0,03\ \mu\text{m}$ als untere Grenze der Kapillarporosität [Rom 78, Smo 76]. In Tafel 3-1 ist eine von der internationalen Vereinigung der angewandten Chemiker (IUPAC) getroffene Einteilung dargestellt, die von Setzer [Set 94] verfeinert und um die Angabe des Gefrierverhaltens des in den Poren evtl. enthaltenen Porenwassers erweitert wurde (siehe Abschnitt 3.2.2.2).

Bild 3-9 illustriert anschaulich, dass sich in Abhängigkeit des Wasserzementwertes ein entsprechendes Porensystem in der Zementsteinmatrix einstellt. Eine vollständige Hydratation des Zements vorausgesetzt, können Kapillarporen erst ab einem Wasserzementwert von 0,40 entstehen. Mit weiter steigendem Wasserzementwert nimmt ihr Anteil überdurchschnittlich zu. Bei einem Wasserzementwert von 0,60 sind die Kapillarporen größtenteils mit einander verbunden und die Transportvorgänge können verstärkt ablaufen [Wes 93, Zta 02]. Dieser Übergang von der Diskontinuität zur Kontinuität erfolgt bei einem Kapillarporenanteil von ca. 25 Vol.-% [Pow 45].

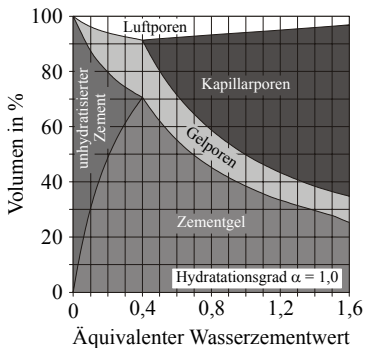


Bild 3-9: Zusammensetzung des Zementsteins bei einem Hydratationsgrad α von 1,0 [Zta 02]

Dieser Zusammenhang wird auch im oberen Diagramm von Bild 3-10 deutlich. Gut erkennbar ist, dass die Wasserdurchlässigkeit als Maß der Kontinuität des Porengefüges ab einem Kapillarporenanteil von ca. 25 Vol.-% stark zunimmt. Das untere Diagramm in Bild 3-10 veranschaulicht, dass neben dem Wasserzementwert der Hydratationsgrad des Zements die Ausbildung des Porensystems maßgeblich beeinflusst. Mit steigendem Hydratationsgrad sinkt der Kapillarporenanteil.

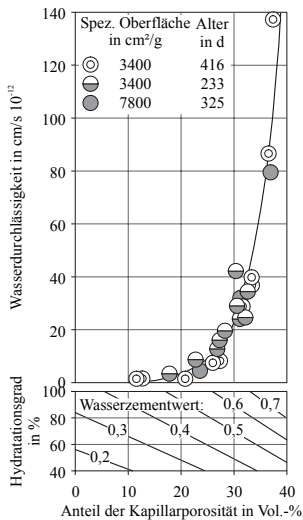


Bild 3-10: Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit von der Kapillarporosität, vom Wasserzementwert und vom Hydratationsgrad des Zements aus [Loc 00]

Unter praxisnahen Bedingungen kann von einem Hydratationsgrad zwischen 70 und 80 % in normalfesten Betonen ausgegangen werden. Um Kontinuität der Poren im Gefüge zu vermeiden, sollte dauerhaftigkeitsrelevanten Einwirkungen ausgesetzter Beton einen Wasserzementwert $\leq 0,50$ aufweisen (siehe Bild 3-10). Bei hochfestem Beton ist wegen des kleineren äquivalenten Wasserzementwertes der Hydratationsgrad unter praxisnahen Bedingungen geringer als bei normalfestem Beton. Deshalb enthalten sie selbst bei optimaler Nachbehandlung und Einsatz von Silikastaub Kapillarporen. Herstellungsbedingt weisen hochfeste Betone dennoch ein sehr dichtes Gefüge mit einer geringen Kapillarporosität auf. Die Kontinuität des Porensystems ist sehr gering.

3.2.2.2 Gefrierverhalten der Porenlösung

Bild 3-11 zeigt ein schematisches Zustandsdiagramm von Wasser. Unter atmosphärischem Druck (1013 mbar) liegen sowohl der Gefrierpunkt als auch der Schmelzpunkt bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bei dieser Temperatur ist der Dampfdruck bzw. die freie Reaktionsenthalpie, also das chemische Potential (μ), von Wasser und Eis gleich. Wasser und Eis können deshalb bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebeneinander existieren. Steigt die Temperatur, steigt die freie Reaktionsenthalpie des Eises stärker als die des Wassers. Wasser ist deshalb die stabilere Phase. Bei Temperaturen $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dreht sich das Verhalten um und Eis ist die stabile Phase.

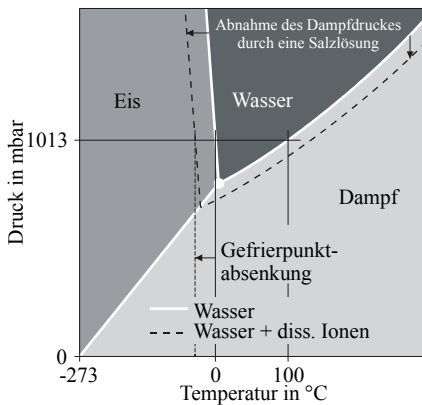


Bild 3-11: Zustandsdiagramm von Wasser bzw. einer Salzlösung

Aufgrund von physikalischen und chemischen Einflüssen, die auf die Porenflüssigkeit im Betongefüge einwirken, kann das Gleichgewicht des Dampfdruckes von Eis und Wasser in Richtung niedriger Temperaturen verschoben werden. Das ist gleichbedeutend mit einer Absenkung des Gefrierpunktes.

Befinden sich im Wasser dissoziierte Ionen, wird der Gefrierpunkt abgesenkt. Entsprechend der Lösungskonzentration werden an der Flüssigkeitsoberfläche durch die dissoziierten Ionen Wassermoleküle verdrängt. Dadurch wird, wie in Bild 3-11 dargestellt, der Dampfdruck nach dem Raoult'schen Gesetz verringert und der Gefrierpunkt der Lösung sinkt. Die Größe der Gefrierpunktabsenkung ist direkt proportional zur Konzentration des gelösten Stoffes. Im gleichen Maße, wie der Gefrierpunkt der Lösung fällt, nimmt auch der Schmelzpunkt des Eises ab. Im Porenwasser eines Betongefüges befindet sich generell eine Vielzahl von dissoziierten Ionen, wie z. B. Alkalien oder Sulfate. Der Gefrierpunkt liegt deshalb immer unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Allerdings ist dieser Einfluss infolge der niedrigen Konzentrationen sehr gering. Durch den Einsatz von Taumitteln erhöht sich die Ionenkonzentration des Porenwassers. Deshalb sinkt der Gefrierpunkt einer Lösung mit steigender Salzkonzentration bis zum Erreichen des eutektischen Punktes kontinuierlich [Hen 75, Sto 79]. Da für das Thema der vorliegenden Arbeit Taumittel keine Rolle spielen, soll deren Einfluss auf das Gefrierverhalten der Porenlösung an dieser Stelle nur erwähnt sein, aber nicht weiter diskutiert werden.

Auf Flüssigkeiten in engen Kapillaren wirken Kräfte ein, die die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Gefrierens und Tauens von Flüssigkeiten beeinflussen. Die Zementsteinmatrix im Festbeton mit einer inneren Oberfläche von rd. $200\text{ m}^2/\text{g}$ besitzt unzählige Porengrößen und -geometrien. Insbesondere ab einem Porenradius von $\leq 0,01\text{ }\mu\text{m}$ verringern die Oberflächenkräfte das chemische Potential des Porenwassers. Die daraus folgende Absenkung des

Gefrierpunktes hängt unmittelbar vom Porenradius ab und ist in Bild 3-12 als Radius-Gefrierpunkt-Beziehung dargestellt [Bru 77, Sto 81].

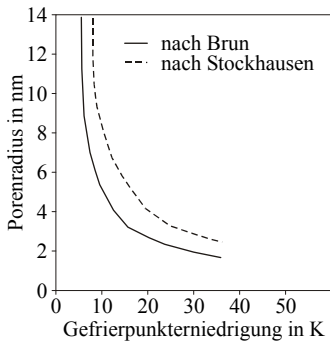


Bild 3-12: Radius-Gefrierpunkt-Beziehung (RGB) für Wasser in zylindrischen Poren aus [Lud 96]

Eine Abschätzung der Temperaturabsenkung für makroskopische Verhältnisse, d. h. unter Vernachlässigung der strukturierenden Wirkung der inneren Oberflächen in sehr kleinen Poren hat z. B. Setzer mit Gleichung 3-2 angegeben [Set 97, Set 99].

$$\Delta T_F \approx \frac{-64 \text{ nm} \cdot \text{K}}{R_{hc}} \text{ bzw. } \Delta T_S \approx \frac{-32 \text{ nm} \cdot \text{K}}{R_{hc}} \quad \text{Gleichung 3-2}$$

mit ΔT_F Absenkung des Gefrierpunktes in K
 ΔT_S Absenkung des Schmelzenpunktes in K
 R_{hc} hydraulischer Radius in nm

Brun et al. und Setzer berücksichtigten in ihren Ansätzen zur Gefrierpunktniedrigung eine ungefrorene, adsorbierte Wasserschicht auf der Festkörperoberfläche. Stockhausen bezog in seinem Ansatz zusätzlich die strukturierende Wirkung der Festkörperoberflächen in sehr kleinen Poren mit ein. Unter diesem Einfluss sinkt das chemische Potential der Porenflüssigkeit stärker als durch auf die Porenflüssigkeit einwirkende Oberflächenkräfte [Sto 81]. Eine Vielzahl von Untersuchungen an Zementsteinen mit Hilfe der DSC und DTA bestätigen die rechnerischen Ansätze zur Gefrierpunktniedrigung in Abhängigkeit der Porengröße [Sto 79, Bag 86, Bed 90]. Mit Hilfe der Untersuchungen von z. B. [Bru 77, Sto 81] erweiterte Setzer die von der internationalen Vereinigung der angewandten Chemiker (IUPAC) getroffene Porengrößeneinteilung um die Angabe zum Gefrierverhalten von in den Poren enthaltenem Porenwasser (siehe Tafel 3-1).

3.2.3 Schädigungsmechanismen

3.2.3.1 Allgemeines

In einer Reihe von nationalen und internationalen Veröffentlichungen werden die grundlegenden Vorgänge im Gefüge zementgebundener Baustoffe bei Temperaturen $< 0^\circ\text{C}$ behandelt. Zahlreiche Autoren haben aus ihren Beobachtungen Modelle zur Beschreibung dieser Phänomene entwickelt und Randbedingungen abgeleitet, unter denen ein Frostangriff ohne oder mit Taumittel eine schädigende Wirkung auf Beton haben kann. Zusammenfassende Darstellungen der Modelle findet man z. B. in [Aub 98, Fag 97, Lud 96, Pig 95, Rön 01]. Die zur Charakterisierung des Frostwiderstands dichter hochfester Betone wichtigen Mechanismen und Modelle werden im Folgenden kurz dargestellt.

3.2.3.2 Thermisch bedingte Spannungen

Im Hinblick auf den Frostwiderstand dichter hochfester Betone können thermisch bedingte Spannungen als Folge ungleicher Temperatúrausdehnungskoeffizienten der Betonausgangsstoffe u. U. einen Einfluss ausüben. Normalerweise sollten die thermisch bedingten Spannungen zwischen Matrix und Gesteinskörnung vernachlässigbar sein, wenn frostwiderstandsfähige Gesteinskörnungen verwendet werden. Da Eis im Vergleich zu Gesteinskörnungen und zur Zementmatrix einen ca. 5fach höheren Temperatúrausdehnungskoeffizienten aufweist, können zwischen Matrix und dem in den Poren gebildeten Eis durchaus nennenswerte thermisch bedingte Spannungen auftreten.

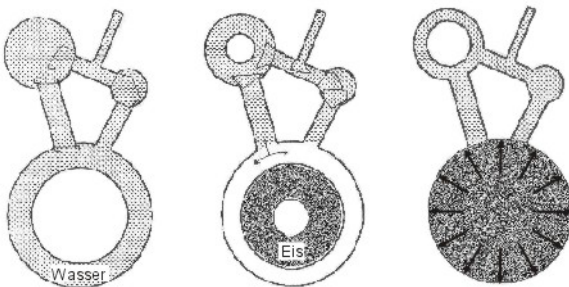


Bild 3-13: Eisdruck in einer Pore [Grü 81]

Zusätzlich wird der Mechanismus dadurch verstärkt, dass bei anhaltender Abkühlung das Eis verstärkt kontrahiert [Grü 81]. In den entstehenden

Zwischenräumen kann aus kleineren Poren noch nicht gefrorene Porenlösung (nach) diffundieren (Bild 3-13 Mitte) und dort gefrieren. Beim Erwärmen wird durch die nun größere Expansion des Eises ein verstärkter Druck aufgebaut, der zu Gefügeschädigungen führt, wenn die Spannungen die Zugfestigkeit des Betons übersteigen (Bild 3-13 rechts).

3.2.3.3 *Hydraulischer Druck und Eisdruck*

Bei einem Frostangriff mit den in der Praxis vorkommenden Temperaturen liegt in den Poren Feuchtigkeit im gasförmigen, flüssigen (Porenwasser) und festen (Eis) Aggregatzustand vor. Da beim Gefrieren von Wasser zu Eis das Volumen um ca. 9 % zunimmt, wird ein entsprechendes noch ungefrorenes Wasservolumen verdrängt. Reicht der in der Pore vorhandene Ausweichraum zur Aufnahme des verdrängten Wasservolumens nicht mehr aus, wird das überschüssige Wasser durch die Matrix in andere noch nicht befüllte Poren gedrückt. Durch diesen Feuchtigkeitstransport entstehen im Gefüge Spannungen, die um so größer sind je mehr Wasser durch die Matrix gedrückt und je stärker der Transport behindert wird. Die durch das vor der Eisfront hergedrückte Wasser generierten Spannungen beschreibt Powers in seinem Modell als hydraulischen Druck [Pow 45].

Ein wesentlicher Faktor für die Behinderung des Feuchtigkeitstransports ist die Anzahl von Luftporen [Pow 45]. Als Kennwerte lassen sich der Mikroluftporengehalt (Gehalt an Poren $< 300 \mu\text{m}$) sowie der Abstandsfaktor ableiten. Der Abstandsfaktor ist als maximale Strecke zwischen dem Ort der Eisbildung und der nächsten Pore (Expansionsraum) definiert. Die Höhe des hydraulischen Drucks wird weiterhin von der Eismenge und der Eisbildungsgeschwindigkeit beeinflusst [Det 89, Sch 61].

Wird die Wasserbewegung bei der Eisbildung vollständig behindert, kann sich theoretisch ein hydraulischer Druck von bis zu 200 N/mm^2 ausbilden [Pow 45]. Zusätzlich entsteht bei entsprechend hoher Porenfüllung neben dem hydraulischen Druck der so genannte Eisdruck. Er generiert Spannungen durch die 9 %ige Volumenzunahme des Wassers bei der Eisbildung. In-situ sind die Drücke wesentlich geringer, da das Porenwasser in einem weiten Temperaturbereich in Abhängigkeit der Porengröße (siehe Abschnitt 3.2.2.2) gefriert. Allerdings treten temporäre Spannungsspitzen auf, da sich Eis zuerst in groben Poren bildet und u. U. den Wassertransport bei der später einsetzenden Eisbildung in kleineren Poren behindert. Auch wächst der hydraulische Druck, wenn durch Eis eingeschlossenes Porenwasser gefriert (siehe Bild 3-13).

3.2.3.4 Kapillarer Effekt

Da der Gefrierpunkt des Porenwassers mit abnehmendem Porenradius sinkt (siehe Abschnitt 3.2.2.2), liegen gleichzeitig im Porenraum der Mörtelmatrix sowohl Eis in den größeren Kapillarporen als auch ungefrorene Porenlösung in den kleineren Kapillarporen und Gelporen vor. Über einem Medium (Porenlösung bzw. Eis) stellt sich in Abhängigkeit der Temperatur ein Dampfdruckgefälle ein [Pow 53]. Deshalb bildet sich zwischen flüssiger Porenlösung und dem Eis der Kapillarporen ein thermodynamisches Ungleichgewicht aus. Dieses kann nur durch einen Flüssigkeitstransport der ungefrorenen Porenlösung zu schon bestehenden Eiskristallen in größeren Poren, zumeist Kapillaren kompensiert werden. Im Unterschied zu den Mechanismen beim hydraulischen Druck findet das durch den kapillaren Effekt hervorgerufene Eiswachstum in entgegengesetzter Richtung zum Flüssigkeitstransport statt.

Mit der Theorie vom kapillaren Effekt lassen sich eine Reihe von in Untersuchungen beobachteten Effekten veranschaulichen. Die an Prüfkörpern beobachtete Kontraktion beim Einfrieren ist auf den Flüssigkeitstransport aus den Gelporen zurückzuführen, der ein verstärktes Schwinden der Mörtelmatrix zur Folge hat. Dagegen können durch das gleichzeitig verlaufende Eiswachstum auch unterhalb des Gefrierpunktes Expansionen beobachtet werden, wenn die Minimaltemperatur über eine gewisse Zeit konstant gehalten wird. Mit dem kapillaren Effekt ist es z. B. weiterhin möglich die von Beaudoin/Mac Innis [Bea 79] beschriebene Expansion von mit Benzol gesättigten Zementsteinproben zu erklären.

3.2.3.5 Kritische Sättigung

Fagerlund verwendet die Ergebnisse zum Feuchtigkeitstransport auf Grund der thermodynamisch bedingten Druckunterschiede in den Poren und vergleicht den Wassergehalt mit dem zur Verfügung stehenden Porenvolumen [Fag 77]. Dieses Verhältnis wurde von ihm als Sättigungswert bezeichnet (Gleichung 3-3). Ein vollständig getrockneter Zementstein hat somit einen Sättigungswert von 0, während der Sättigungswert 1 beträgt, wenn sämtliche Poren mit Wasser gefüllt sind.

$$S = \frac{W_e}{P_{\text{tot}}} \cdot 100 \%$$

Gleichung 3-3

mit S Sättigung des Gefüges in %
 W_e verdampfbarer Wassergehalt in m^3/m^3
 P_{tot} Gesamtporosität in m^3/m^3

Übersteigt der vorhandene Feuchtigkeitsgehalt einen kritischen Wert, kann der Beton in einem oder wenigen Frost-Tau-Wechseln stark geschädigt werden. Fagerlund führte den Begriff der „kritischen Sättigung“ zur Charakterisierung des Feuchtigkeitsgehaltes im Porensystem ein [Fag 97]. Theoretisch folgt, dass eine kritische Sättigung bei einem Sättigungswert von $\geq 91 \%$ auftritt, da sich das Volumen beim Phasenübergang von Wasser zu Eis um ca. 9 % vergrößert.

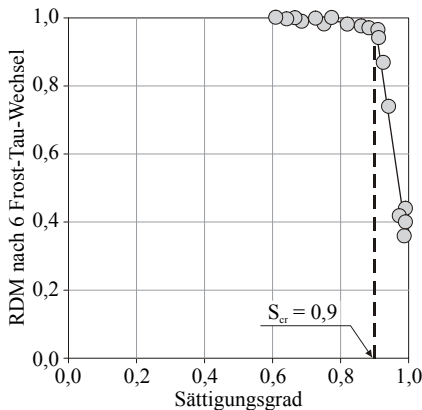


Bild 3-14: Ermittlung der kritischen Sättigung nach Fagerlund [Fag 97]

Da sich in der hochporösen Matrix des Betons mehrere physikalische Effekte überlagern, können Schäden auch bei Sättigungswerten unterhalb der theoretischen kritischen Sättigung auftreten. An Betonen ohne ein künstlich eingeführtes Luftporensystem wurden in Untersuchungen von Fagerlund kritische Sättigungen von 70 % bis 90 % ermittelt (siehe Bild 3-14) [Fag 77]. Der Sättigungsgrad eines Betons mit hohem Frostwiderstand ist während der gesamten Nutzungsdauer stets kleiner als die kritische Sättigung.

3.2.3.6 Thermodynamisches Modell

Setzer berücksichtigte in seinen als „thermodynamisches Modell“ bekannt gewordenen Betrachtungen zur Beschreibung des Frostwiderstands erstmals die Wirkungen von Oberflächenkräften auf das Gefrierverhalten von Porenwasser

[Set 77]. Aus einer Vielzahl von Untersuchungsergebnissen schloss er, dass eine flüssigkeitsähnliche, adsorbierte Schicht zwischen den Eiskristallen und der Porenwandung bis zu sehr tiefen Temperaturen verbleibt. Die Existenz dieser Schicht wurde in Versuchen nachgewiesen [Bar 80, Der 81]. Die Dicke der adsorbierten Schicht ist temperaturabhängig und steht im thermodynamischen Gleichgewicht mit dem Eis und dem Wasserdampf in der Pore. Durch die neuen Grenzschichten (Wasser \leftrightarrow Dampf bzw. Wasser \leftrightarrow Eis) und die damit verbundene Verschiebung des Tripelpunktes entstehen zusätzliche Oberflächenspannungen, die zu inneren Drücken führen. Die Drücke lassen sich auf Grund der engen Beziehung zwischen Porenradius und Gefrierpunkt (siehe Abschnitt 3.2.2.2) durch eine zu erwartende Temperaturabsenkung in der Mörtelmatrix nach Gleichung 3-4 abschätzen.

$$\Delta p_{\text{gefr}} \approx 1,22 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2 \cdot \text{K}} \cdot \Delta T \quad \text{Gleichung 3-4}$$

mit Δp_{gefr} Druckdifferenz in N/mm²
 ΔT Temperaturabsenkung in K

Entsprechend Gleichung 3-4 werden im Betongefüge erhebliche Unterdrücke generiert, die nicht von der Porengröße jedoch unmittelbar von der Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes abhängig sind. Auf Basis dieser thermodynamischen Überlegungen und der Tatsache, dass die Zementsteinmatrix bei solchen Unterdrücken nicht mehr unendlich starr sein kann, formulierte Setzer die Theorie der Mikroeislinsen [Set 99]. Sie ist in Bild 3-15 schematisch dargestellt.

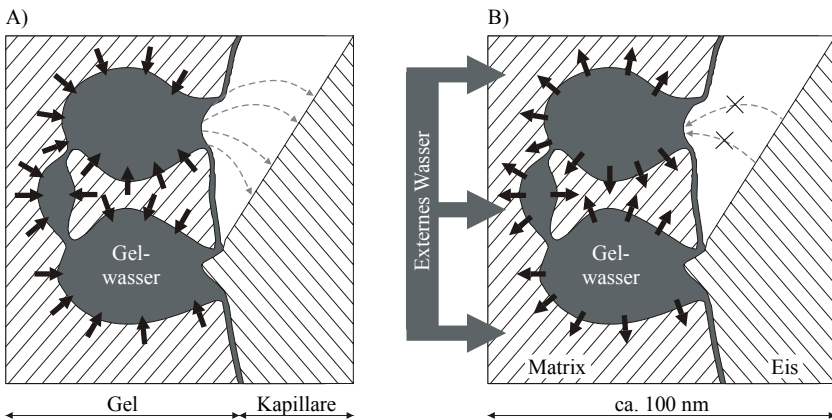


Bild 3-15: Schemadarstellung der Mikroeislintheorie nach [Set 02]; A) Einfrieren B) Auftauen

Bild 3-15 A) veranschaulicht die Verhältnisse beim Frieren. Auf Grund der in unseren Breiten herrschenden bzw. bei den Laborverfahren definierten Minimaltemperaturen ist das Porenwasser der Kapillaren gefroren, während das der Gelporen im ungefrorenen Zustand verbleibt. Infolge des sich ausbildenden thermodynamischen Ungleichgewichts wird das ungefrorene Gelporenwasser zum Eis der Kapillarporen transportiert und friert an ihm an. Durch die nach Gleichung 3-4 entstehenden Unterdrücke zieht sich der Gelporenraum zusammen. Entsprechend nehmen beim Auftauen die Drücke wieder ab. Der Gelporenraum expandiert und ist bestrebt, Porenwasser wieder aufzunehmen. Der Rücktransport von den Kapillarporen ist jedoch anfänglich behindert, da in diesen Poren die Schmelztemperatur entsprechend der Radius-Gefrierpunkt-Beziehung noch nicht erreicht ist. Steht außerhalb des Gefüges zu diesem Zeitpunkt Flüssigkeit zur Verfügung, wird diese in den Gelporenraum „aufgesaugt“ (Bild 3-15 B)).

Eine Reihe von Untersuchungen und Beobachtungen stützt das Mikroeilinsenmodell. Das Gefrierschwinden bzw. Tauquellen nicht völlig wassergesättigter Proben sowie die Expansion bei der Eisbildung, wenn für das aus den Gelporen transportierte Wasser nicht genügend Ausweichraum vorhanden ist, konnte u. a. von Stockhausen an Zementsteinen oder von Auberg an Betonen experimentell nachgewiesen werden [Sto 81, Aub 98]. Die infolge der Mikroeilinsentheorie hergeleitete zusätzliche Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel wird jedes Mal bei der Prüfung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstands mittels CDF- oder CIF-Verfahren erfasst. Der Feuchtigkeitsgehalt, der durch eine wiederholte Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung hervorgerufen wird, kann deutlich den Wert übersteigen, der durch kapillares Saugen maximal erreichbar ist [Set 02].

3.3 Frostwiderstand hochfester Betone

3.3.1 Laboruntersuchungen

Hochfeste Betone weisen eine geringe Kapillarporosität auf, da sie i. d. R. mit äquivalenten Wasserzementwerten $< 0,40$ hergestellt werden. Durch den Einsatz von Zusatzstoffen mit einer großen spezifischen Oberfläche und einer häufig hohen puzzolanischen Reaktivität (z. B. Silikastaub) wird das Gefüge weiter verdichtet. Außerdem wirken unhydratisierte Zementbestandteile und unreaktierte Zusatzstoffpartikel als Füller, was ebenfalls zu einer Verdichtung der Zementsteinmatrix führt [Tre 80, Fel 86, Sar 87, Scr 88, Rei 95]. Die Porosität der Verbundzone zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskorn wird gegenüber Normalbeton durch den Einsatz von Silikastaub verringert [Ben 88].

Hochfeste Betone besitzen auf Grund ihrer Zusammensetzung ein dichtes Gefüge ohne bzw. mit niedrigem Kapillarporenanteil sowie einem geringen Gehalt an gefrierbarem Wasser. Deshalb und auf der Grundlage der eingangs beschriebenen Modellvorstellungen sollten sie auch ohne ein künstlich eingeführtes Luftporensystem grundsätzlich einen hohen Frostwiderstand aufweisen.

Während die mechanischen Eigenschaften hochfester Betone (siehe Abschnitt 3.1.3) intensiv erforscht und Stoffgesetze daraus weiter entwickelt wurden z. B. [Hel 90, Hel 92, Kön 98], liegen nur wenige Erfahrungen im Hinblick auf den Frostwiderstand vor.

Eine Auswertung von Untersuchungen bis zum Jahr 1995 enthält [Pig 95]. Dort wird u. a. über Versuche von Okada et al. [Oka 81], Yamato et al. [Yam 88], Malhotra et al. [Mal 87] sowie Hammer und Sellevold [Ham 91] berichtet, deren Ergebnisse z. T. widersprüchlich sind. So ist nach [Oka 81] davon auszugehen, dass Betone mit einem Wasserzementwert kleiner 0,35 und einer Druckfestigkeit $> 80 \text{ N/mm}^2$ grundsätzlich auch ohne künstlich eingeführte Luftporen einen ausreichend hohen Frostwiderstand aufweisen. Yamato et al. [Yam 88] geben an, dass Betone mit äquivalenten Wasserzementwerten $(w/z)_{eq} = 0,25$ und einem Austausch von bis zu 30 M.-% Zement gegen Silikastaub auch ohne künstliche Luftporen ausreichend frostbeständig sind. Bei Wasserzementwerten $> 0,35$ kann ein ausreichender Frostwiderstand nur durch künstlich eingebrachte Luftporen erreicht werden. Nach Untersuchungen von Malhotra et al. [Mal 87] ist bei Wasserzementwerten zwischen 0,25 und 0,35 grundsätzlich der Einsatz eines Luftporenbildners notwendig. Ähnliches berichten auch Hammer und Sellevold [Ham 91] für einen Beton mit einem Wasserzementwert von 0,26.

In [Pig 87] wurden hochfeste Betone unter Verwendung von Portlandzement mit einem äquivalenten Wasserzementwert von 0,30 ohne und mit Silikastaub untersucht. Das Verhältnis von Silikastaub zu Zement betrug bei den Versuchen 0,10. Bei ansonsten unveränderter Zusammensetzung wurden gezielt der Luftgehalt und der Abstandsfaktor durch die Verwendung eines Luftporenbildners im Festbeton variiert. Die Probekörper wurden über 300 Frost-Tau-Wechsel sowohl in Wasser als auch an Luft eingefroren bzw. aufgetaut. Dehnungen bzw. Schalllaufzeiten wurden als Kriterium des Frostwiderstands ermittelt. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die untersuchten Betone mit künstlich eingebrachten Luftporen hergestellt werden müssen, um einen ausreichenden Frostwiderstand sicherzustellen. Aus den Versuchsergebnissen wurden so genannte kritische Abstandsfaktoren ermittelt. Bei deren Überschreitung tritt eine deutliche Zunahme der Dehnungen und/oder eine deutliche Abnahme des aus den Schalllaufzeitmessungen abgeleiteten Dauerhaftigkeits-

faktors, der der Änderung des relativen dynamischen E-Moduls entspricht, auf. Für Beton ohne Silikastaub wird ein kritischer Abstandsfaktor von rd. 0,40 mm angegeben. Bei Verwendung von Silikastaub liegt der Wert bei rd. 0,30 mm.

Die Untersuchungen von [Pig 87] wurden mit einem Wasserzementwert von 0,25, jedoch ohne Silikastaub, fortgesetzt [Foy 88]. Die Abstandsfaktoren der Festbetone wurden wiederum durch die Zugabe eines Luftporenbildners zwischen rd. 0,56 und 0,76 mm variiert. Aus der Beurteilung der Betone nach 300 Frost-Tau-Wechseln wird ein kritischer Abstandsfaktor von rd. 0,75 mm abgeleitet. Bei den in [Foy 88] dargestellten Untersuchungen fällt auf, dass sich bei zwei Betonen, die ohne den Zusatz eines Luftporenbildners hergestellt wurden, bei gleichem Zementgehalt und gleichem Wasserzementwert sowie annähernd identischen Luftgehalten in Frisch- und Festbeton unterschiedliche Abstandsfaktoren und damit verbunden, erhebliche Unterschiede im Dehnungsverhalten bei der Frostprüfung einstellten. Der Beton, bei dem anhand eines Kriteriums für die Längenänderung von einer erheblichen Schädigung ausgegangen wurde (zwei von drei Probekörpern zeigten deutliche Schäden), wies dabei eine gröbere Sieblinie des Gesteinskörnungsgemisches auf. An diesem Beton wurde nach 300 Frost-Tau-Wechseln ebenfalls eine signifikante Massezunahme festgestellt, die auf eine erhöhte Wasseraufnahme hindeutete. Eine abschließende Begründung für das Verhalten dieses Betons konnte in [Foy 88] jedoch nicht angegeben werden. Als mögliche Ursachen werden eine unregelmäßige Verteilung von Luftporen und damit lokal größere Abstandsfaktoren im Festbeton genannt.

Der Einfluss von Portlandzementen mit unterschiedlicher Festigkeitsentwicklung (ASTM Typ I und III) auf den Frostwiderstand hochfester Betone ohne und mit Silikastaub wurde in [Gag 91, Pig 91] untersucht. Für Betone mit dem frühhochfesten Zement Typ III wurde ohne und mit Silikastaub ein äquivalenter Wasserzementwert von 0,30 als Untergrenze ermittelt, ab der keine künstlich eingeführten Luftporen zur Sicherstellung eines ausreichenden Frostwiderstands notwendig sind. Unter Verwendung des langsamer erhärtenden Zementes Typ I wurde ein äquivalenter Wasserzementwert von 0,25 als Richtwert angegeben.

Auf der Grundlage der dargestellten Versuchsergebnisse wird in [Pig 95] die Schlussfolgerung gezogen, dass mit einem äquivalenten Wasserzementwert $\leq 0,25$ grundsätzlich ein ausreichender Frostwiderstand ohne zusätzlich eingeführte Luftporen erreicht werden kann. Dagegen ist ein künstliches Luftporensystem bei Wasserzementwerten $\geq 0,35$ notwendig. In den Zwischenbereichen sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Guse et al. [Gus 94] untersuchten den Frostwiderstand hochfester Betone mit einem äquivalenten Wasserzementwert von 0,30 unter Verwendung eines Portlandzementes CEM I 42,5 R ohne und mit Silikastaub sowie ohne und mit Luftporenbildner anhand der Oberflächenabwitterungen. Während die Betone mit Luftporenbildner Abstandsfaktoren von 0,25 bzw. 0,29 mm aufwiesen, lagen die entsprechenden Werte der Betone ohne künstlich eingebrachte Luftporen bei 0,99 bzw. 0,89 mm. Trotz dieser Unterschiede wurden keine signifikanten Änderungen im Abwitterungsverhalten festgestellt. Eine evtl. vorliegende innere Schädigung der Betone wurde nicht untersucht.

Neuere Untersuchungen an hochfesten Betonen ohne und mit Silikastaub sowie unterschiedlichen äquivalenten Wasserzementwerten zeigen einen deutlichen Einfluss des Silikastaubs auf den Frostwiderstand [Fel 04, Fel 04a, Pal 04]. Das Gefüge silikastaubhaltiger Betone mit äquivalenten Wasserzementwerten zwischen 0,35 und 0,45 und ohne künstlich eingeführte Luftporen wurde bei diesen Versuchen z. T. innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel stark geschädigt. Silikastaubhaltige Betone mit geringeren äquivalenten Wasserzementwerten sowie alle Betone ohne Silikastaub besaßen einen hohen Frostwiderstand.

3.3.2 Mikrorissneigung

In verschiedenen Untersuchungen zur Prüfung der Leistungsfähigkeit von Betonen mit niedrigen äquivalenten Wasserzementwerten ohne und mit Silikastaub wurde die Mikrorissbildung im Gefüge solcher Betone beobachtet oder als mögliche Ursache für die Ausbildung bestimmter Betoneigenschaften vermutet [z. B. Gus 94, Hei 99, Sch 98, Wie 96, Wie 98]. Die Ursachen für die Entstehung von Mikrorissen konnten jedoch bislang ebenso wenig abschließend geklärt werden, wie ihre Auswirkung auf dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften des Betons.

In [Men 96] wird das Auftreten von Mikrorissen in Betonen mit niedrigen äquivalenten Wasserzementwerten mit der Reaktionscharakteristik der Frühphase des in diesen Betonen i. d. R. enthaltenden Silikastaubs in Verbindung gebracht. Man geht davon aus, dass Silikastaub in der Frühphase große Wassermengen in wasserreichem Gel bindet, dass dieses Wasser jedoch innerhalb weniger Stunden wieder abgegeben wird. Nach [Wie 98] hat diese Entwässerung im erhärteten Zementstein eine Volumenverringerung und damit ein Schwinden zur Folge. Überschreiten die Schwinddehnungen die Zugbruchdehnung des Betons, kommt es zur Ausbildung von Mikrorissen.

In Bereichen, in denen ein gut vernetztes System von Mikrorissen vorhanden ist, besteht grundsätzlich die Möglichkeit des verstärkten Eindringens von Flüssig-

keit und/oder schädlichen Bestandteilen (z. B. Chlorid) [Sch 98, Wie 98]. Da der Grad der Wassersättigung entscheidend für den Frostwiderstand ist, kann eine vor der Frostbeanspruchung induzierte Mikrorissbildung diese Dauerhaftigkeitseigenschaft ggf. negativ beeinflussen.

Es liegen jedoch bislang keine Ergebnisse darüber vor, inwieweit der Frostwiderstand von Betonen mit niedrigen äquivalenten Wasserzementwerten durch eine vor der Frostbeanspruchung vorhandene Mikrorissbildung beeinflusst wird.

In [Kuk 92] wurde festgestellt, dass die Ausbreitungsrichtung der Risse, die während einer Frostbeanspruchung von hochfesten Betonen entstehen, in Beziehung zu den Gesteinskörnern steht. Die Risse verlaufen rechtwinklig oder parallel zu den Korngrenzen. Die Verfasser von [Jac 95, Rön 01, Utg 04] beobachteten, dass die Risse entlang der Korngrenzen verlaufen.

3.3.3 Übertragbarkeit auf Praxisverhältnisse

Ein Frostscha- den kann, wie die zuvor beschriebenen Mechanismen zeigen, letztlich immer dann auftreten, wenn das Porensystem des Betons bis zu einem gewissen Grad mit Wasser gefüllt ist. Dies gilt sowohl für Laborversuche als auch für das Verhalten des Betons in der Praxis.

Der Frostwiderstand eines Betons in einem Bauwerk bzw. –teil soll über dessen gesamte Nutzungsdauer mit Laborprüfverfahren vorausgesagt werden. Die zeitliche Verkürzung im Labormaßstab bedingt, dass die Prüfbedingungen im Labor gegenüber den Verhältnissen in der Praxis deutlich verschärft werden. Neben deutlich schnelleren Gefrier- und Auftauraten sowie tieferen Minimaltemperaturen wird der Zeitraffereffekt mit höheren Feuchtigkeitsgehalten in den zu prüfenden Betonen erzeugt. Zusätzlich werden z. T. Probekörper vor dem Frostangriff kapillar vorgesättigt. Für die Prüfung ist es nicht zwingend notwendig, dass die in der Praxis vorliegenden Bedingungen in jedem Fall in den Laborprüfverfahren genau wiedergegeben werden. Jedoch sollte jedes Laborprüfverfahren mit einer hohen Präzision das Verhalten des Betons in der Praxis beschreiben. Solche Korrelationen zwischen Laborprüfverfahren und Praxisverhalten liegen insbesondere zum Frostwiderstand von Betonen in nicht ausreichendem Maße vor, um z. Z. gesicherte Grenzwerte für die Laborprüfung in den entsprechenden Stoffnormen (z. B. DIN 1045-2 oder DIN EN 206-2) angeben zu können.

Für hochfeste Betone finden sich einige Untersuchungen zum baupraktischen Verhalten bei einem Frostangriff u. a. in [Hol 04 oder Utg 04] sowie in der

mitgelieferten Datenbank von [Hol 04]. Versuche von Utgenannt zeigten [Utg 04], dass an verschiedenen Auslagerungsorten innere Gefügeschädigungen schon nach fünf Wintern nur an silikastaubhaltigen hochfesten Betonen mit einem $(w/z)_{eq} \geq 0,40$ auftraten. Stieg der äquivalente Wasserzementwert auf $\geq 0,75$ an, wiesen, wie nicht anders zu erwarten, auch andere Betone ohne Silikastaub Gefügeschäden auf. In [Hol 04] wurde ein Vergleich zwischen baupraktischem Verhalten und Laborprüfung eines silikastaubhaltigen Betons mit einem $(w/z)_{eq}$ von 0,42 gezogen. Wie Bild 3-17 zeigt, fiel der relative dynamische E-Modul des Betons innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel deutlich ab. Das Betongefüge wurde stark geschädigt. Schon nach zwei Wintern mit Temperaturen bis $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ war auch an den ausgelagerten Proben ein Abfall des relativen dynamischen E-Moduls, d. h. der Beginn einer inneren Gefügeschädigung feststellbar.

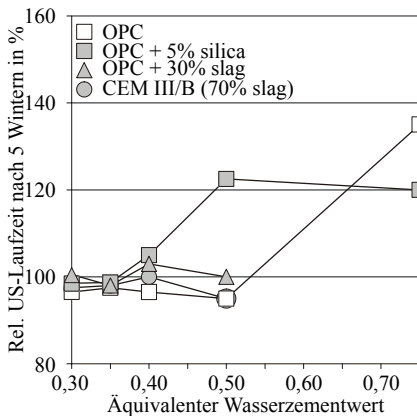


Bild 3-16: Ultraschalllaufzeit durch verschiedene Betone nach 5 Wintern bezogen auf den Ausgangswert [Utg 04]

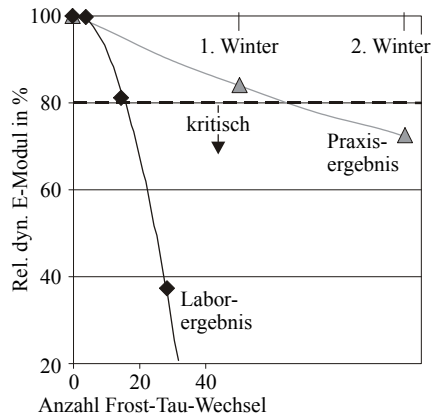


Bild 3-17: Labor- und Praxisverhalten eines hochfesten Betons ($(w/z)_{eq} = 0,42$; 7 M.-% Silikastaub) [Hol 04]

Ferner wurde im Rahmen des von der Europäischen Union finanzierten Forschungsvorhabens CONLife eine Datenbank mit Bauwerken bzw. -teilen aus hochfesten Betonen erstellt. Die Datenbank ist in [Hol 04] enthalten. In ihr finden sich eine Reihe von Bauwerken (Brücken bzw. Straßen), die einem regelmäßigen Frostangriff und einer hohen Wassersättigung während ihrer bisherigen Nutzungsdauer ausgesetzt waren. Für die Auswertung war zu berücksichtigen, dass die Betone unterschiedlich zusammengesetzt sind, aus verschiedenartigen Ausgangsstoffen hergestellt wurden und die Qualität der Bauausführung nicht nachvollziehbar war. Dennoch bestätigte sich der von Utgenannt in [Utg 04] dargestellte Zusammenhang, dass silikastaubhaltige

Betone mit äquivalenten Wasserzementwerten bis 0,35 Schäden infolge eines Frostangriffs zeigten. Hingegen waren Betone ohne Silikastaub i. d. R. nicht geschädigt.

Auch mit den vorliegenden Ergebnissen zum Praxisverhalten zeigt sich, dass der Frostwiderstand hochfester Betone mit Silikastaub aber ohne künstlich eingeführtes Luftporensystem tendenziell kritischer zu bewerten ist als der von vergleichbaren Betonen ohne Silikastaub. Der schon aus der Auswertung der Laborprüfungen (Abschnitt 3.3.1) abgeleitete Zusammenhang wird bestätigt und zeigt die Praxisrelevanz der Problematik. Mehr Wissen zum Einfluss des Silikastaubs auf den Frostwiderstand von hochfesten Betonen ist notwendig.

3.4 Beeinflussung des Frostwiderstands durch Silikastaub

3.4.1 Einfluss des Silikastaubs auf die Gefügeausbildung

Die mittlere Partikelgröße des Silikastaubs ist im Vergleich zu der des Zements rund 100fach kleiner (Bild 3-18). Zwickelräume zwischen den einzelnen Zementkörnern bzw. den Gesteinskörnern werden ausgefüllt. Deshalb steigt die Dichte der Zementsteinmatrix erheblich an [Bee 89]. Neben dieser reinen Füllerwirkung fungieren die wesentlich kleineren Silikastaubpartikel bei der Zementhydratation als Keimbildner. Dadurch erhöht sich die Hydratationsgeschwindigkeit des Klinkers [Bee 89, Rei 95].

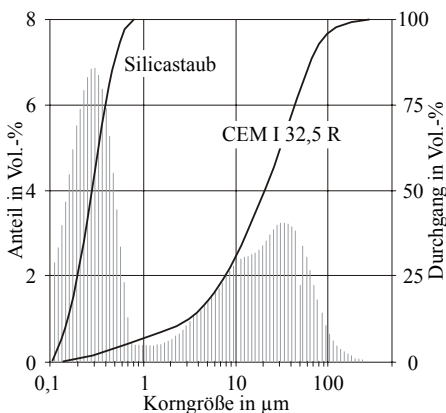


Bild 3-18: Korngrößenverteilung von Silikastaub im Vergleich zu Portlandzement [Sta 98]

Die puzzolanische Reaktion des Silikastaubs wurde in Abschnitt 3.1.2 und mit Gleichung 3-1 erläutert. Infolge dieser Reaktion entstehen weitere festigkeitsbildende CSH-Phasen. Diese verdichten zusätzlich, wie in Bild 3-4 gezeigt, die

Matrix und insbesondere die Kontaktzone zwischen Matrix und Gesteinskörnung [Scr 88].

Untersuchungen von Sellevold et al. zeigen, dass bei einem Austausch von Zement durch 4 bis 20 M.-% Silikastaub bei gleichem äquivalenten Wasserelementwert (Gleichung 4-1) die Gesamtporosität unabhängig vom Silikastaubgehalt annähernd unverändert bleibt [Sel 86]. Bild 3-19 zeigt vielmehr, dass der Silikastaub eine Veränderung der Porenstruktur bewirkt, indem sich die Porengrößen von größeren zu kleineren Porenradien verschieben [Meh 82, Gus 98]. Unter Berücksichtigung der von Romberg und Smolczyk definierten Grenze zwischen Gel- und Kapillarporosität [Smo 76, Rom 78], verringert sich durch den Einsatz von Silikastaub die Kapillarporosität, während sich der Anteil an Gelporen erhöht.

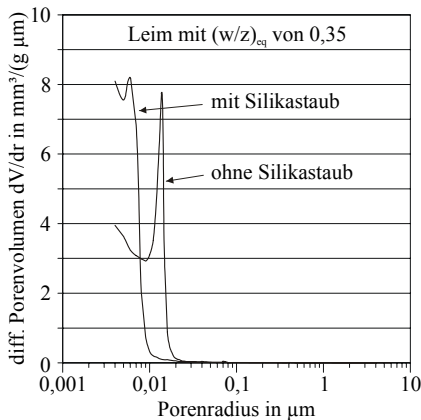


Bild 3-19: Einfluss des Silikastaubs auf die Porenradienverteilung von Zementleimen im Alter von 28 Tagen

Im Gegensatz zu [Sel 86] stellten Guse et al. mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie eine Abnahme der Gesamtporosität (Hg-Porosität) durch den Einsatz von Silikastaub fest [Gus 98]. Aus dem Ergebnis von Guse et al. ist zu schließen, dass sich infolge des Silikastaubeinsatzes mehr Poren mit Porenradien $< 0,004 \mu\text{m}$ ausbilden, die nicht mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie erfassbar sind. In [Sel 86] wird von Untersuchungen von Sellevold und Christensen berichtet, die zu dem Schluss kamen, dass der Silikastaub im Vergleich zu Zement dreimal so wirksam ist, die Kapillarporosität zu verringern.

3.4.2 Einfluss des Silikastaubs auf den Wasserhaushalt

Die puzzolanische Reaktion des Silikastaubs erfolgt vereinfacht gemäß Gleichung 3-1, d. h., das amorphe Siliciumdioxid reagiert mit dem bei der Zementhydratation gebildeten Calciumhydroxid zu CSH-Phasen ohne dass weiteres Wasser chemisch eingebunden wird. Der Gehalt an chemisch gebundenem Wasser ist, wie in Bild 3-20 dargestellt, insbesondere zu Beginn der Hydratation bei Zementsteinen mit Silikastaub höher als bei vergleichbaren Zementsteinen ohne Silikastaub. Sellevold konnte dies auf einen höheren Hydratationsgrad des Zements zurückführen, der sich infolge der beschleunigenden Wirkung des Silikastaubs (siehe Abschnitt 3.1.2) einstellt [Sel 82]. Neuere Untersuchungen bestätigten die Annahme, dass das chemisch gebundene Wasser in den CSH-Phasen des Silikastaubs aus dem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und nicht aus dem Anmachwasser stammt [Sel 92]. Im Sachstandsbericht von Hårdtl et al. wurde ähnliches auch für die puzzolanischen Reaktion von Steinkohlenflugasche berichtet [Här 93].

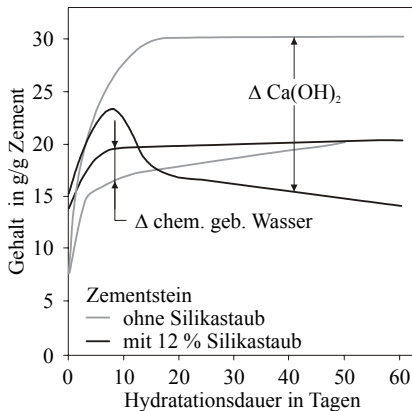


Bild 3-20: Gehalt an chemisch gebundenen Wasser und an $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in Abhängigkeit der Hydrationsdauer [Sel 82]

Zwischen 90 und 550 Tagen wurde von Zhang und Gjörv ein Rückgang des Anteils an chemisch gebundenem Wasser in silikastaubhaltigen Zementsteinen beobachtet [Zha 91]. Die Ursachen liegen in einer verstärkten Polymerisation der Silikate. Bei der Polymerisation wird Wasser abgegeben. Da infolge der Füllerwirkung und der puzzolanischen Reaktion das Gefüge deutlich verdichtet wird (siehe Abschnitt 3.4.1), ist die Diffusion von Flüssigkeiten und Gasen stark vermindert. Das hat zur Folge, dass die Verdunstung von im Gefüge vorhandenem, nicht chemisch gebundenem Wasser im Vergleich zu Beton ohne Silikastaub bzw. normalfestem Beton behindert oder zumindest verlangsamt sein sollte.

3.4.3 Einfluss des Silikastaubs auf die Reaktionsprodukte

Der als Zusatzstoff verwendete Silikastaub besitzt durch seine hohe Feinheit und seinen hohen Anteil an amorphem Siliciumdioxid eine hohe puzzolanische Reaktivität [Tre 78, Sar 87]. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird durch die Menge an Wasser und die Packungsdichte beeinflusst. Für die puzzolanische Reaktion nach Gleichung 3-1 muss der Silikastaub gelöst werden damit die Reaktionspartner zueinander diffundieren und die eigentliche puzzolanische Reaktion stattfinden kann [Syb 93]. Auf der Silikastauboberfläche werden im Kontakt mit einer wässrigen Zementleimsuspension unmittelbar Alkalien (Na^+ , K^+), Hydroxidgruppen (OH^-) und insbesondere Calcium (Ca^{2+}) adsorbiert [Urh 87]. In einer $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung werden hauptsächlich kleine Silikastaubpartikel während der ersten Stunden zu einem wasserreichen kalkarmen Silikagel gelöst [Gru 83]. Mit dem adsorbierten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ werden in der Folge erste CSH-Phasen gebildet.

Insbesondere innerhalb der Frühphase (bis 3 Tage) reagiert ein Großteil des Silikastaubs [Li 85]. In hochfesten Betonen verläuft die puzzolanische Reaktion verlangsamt [Sar 87], da auf Grund des geringen Wasserzementwertes der Silikastaub langsamer gelöst und infolge des dichteren Gefüges die Diffusion der Reaktionspartner erschwert wird. Bild 3-21 zeigt, dass nach 28 Tagen aber auch noch zu späteren Zeitpunkten nicht unerhebliche Anteile unreaktierten Silikastaubs in silikastaubhaltigen Zementsteinen verbleiben [Li 85, Dob 88, Sun 93, Bro 97, Jus 98].

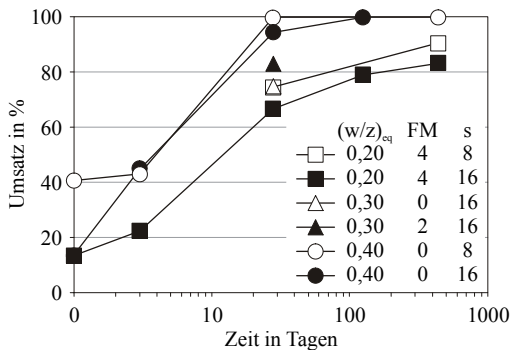


Bild 3-21: Puzzolanische Aktivität (Umsatz) von Silikastaub in Abhängigkeit der Hydrationsdauer [Jus 98]

Indirekt werden die Untersuchungsergebnisse von u. a. Urhan oder Stich et al. bestätigt [Urh 87, Sti 97]. Sie haben eine starke Verlangsamung der puzzolanischen Reaktion nach rd. 50 Tagen an Hand von Untersuchungen zum Gehalt an freiem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ festgestellt.

Die Morphologie der CSH-Phasen wird durch deren molares Verhältnis von Calciumoxid zu Siliciumdioxid, das C/S-Verhältnis, bestimmt. An der Stelle des durchhydratisierten Zementkorns entsteht das dichte, CaO-ärmere CSH (I), während das äußere, CaO-reichere CSH (II) die Zwischenräume zwischen den Zementpartikeln mit Leisten oder Fasern ausfüllt [Loc 00]. Locher gab insgesamt für CSH C/S-Verhältnisse zwischen 1,2 und 2,3 an [Loc 00]. Für CSH-Phasen von Portlandzement ermittelten u. a. Richardson oder Taylor einen Wert von ungefähr 1,75 [Ric 99, Tay 86]. Die untere Stabilitätsgrenze der CSH-Phasen liegt nach dem Strukturmodell des Tobermorits bei einem C/S-Verhältnis von 0,9 [Wei 89]. In [Roy 89] wird ein C/S-Verhältnis von $< 0,8$ angegeben, ab dem die Hydratphasen thermodynamisch instabil sind.

Bei der puzzolanischen Reaktion des Silikastaubs werden vergleichbare CSH-Phasen gebildet wie bei der Zementhydratation. Sie können jedoch auf Grund der stofflichen Voraussetzungen der Ausgangsstoffe eine andere Morphologie aufweisen. Das C/S-Verhältnis der aus der puzzolanischen Reaktion stammenden CSH-Phasen wird auf etwa 1 geschätzt. In einer Vielzahl von Untersuchungen wurden in CSH-Phasen silikastaubhaltiger Zementsteine C/S-Verhältnisse von ca. 0,9 bis 1,2 gefunden [Tre 78, Reg 82, Mal 87a]. Groves et al. und Taylor fanden eine Abnahme des C/S-Verhältnisses auf Werte unter 1, wenn der Gehalt an Silikastaub anstieg [Gro 89, Tay 97]. Sie führten das auf ein Überangebot an Siliciumdioxid zurück, bei dem vergleichsweise wenig Calciumoxid in die CSH-Phase eingebaut wird. Das C/S-Verhältnis der untersuchten CSH-Phasen lag in jedem Fall oberhalb der z. B. von Roy oder Wei angegebenen thermodynamischen Stabilitätsgrenzen [Roy 89, Wei 89].

Zu anderen Ergebnissen kamen z. B. Gatty et al. oder Schäfer [Gat 98, Sch 04]. Die von ihnen untersuchten Reaktionsprodukte des Silikastaubs wiesen C/S-Verhältnisse von bis zu 0,4 auf. Dagegen stieg das C/S-Verhältnis auf bis 2 bzw. 3 im Kontaktbereich zu unhydratisierten C_2S - bzw. C_3S -Klinkerkörnern an. Auf Grund des hohen Siliciumanteils in den Reaktionsprodukten des Silikastaubs kam Schäfer zu dem Schluss, dass sich neben thermodynamisch stabilen CSH-Phasen auch Silikagele gebildet haben müssen [Sch 04]. Brough et al. und Cong et al. fanden bei silikastaubhaltigen Zementleimen in ^{29}Si NMR-Spektren (Q^3) Gruppen (siehe Abschnitt 4.3.6.5), die sie als Calcium modifiziertes Silikagel interpretierten [Bro 97, Con 98].

Die These von der Bildung wasserreicher Silikagele bzw. Alkalisilikate wird auch in Untersuchungen zum Schwindverhalten und zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion silikastaubhaltiger Betone vertreten. Ein ausreichendes $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Angebot vorausgesetzt, bildet sich nach Grutzeck ein wasserreiches, voluminöses Silikagel mit einem geringen C/S-Verhältnis [Gru 82, Gru 83]. Nur unter bestimmten Randbedingungen kommt es zu einer Entwässerung dieser

Gele, die dann zum Austrocknungsschwinden führen [Gru 83]. Bei der Beschreibung der Mechanismen einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion silikastaubhaltiger Betone stellte Helmuth die Bildung wasserreiche Alkalisilikat-Gele fest [Hel 92a]. Diese Alkalisilikat-Gele entstehen, wenn die Siloxan-Brücken des amorphen Silikastaubs durch Hydroxidionen der Porenlösung aufgebrochen werden. Bei diesem Auflösungsprozess binden sich Alkaliionen aus der Porenlösung an die freiwerdenden Valenzen der SiO_4 -Tetraeder. Dieses Aufbrechen bewirkt eine chemische Verschiebung bei der ^{29}Si NMR-Spektroskopie (siehe Abschnitt 4.3.6.5).

4 Versuchsdurchführung

4.1 Ausgangsstoffe

4.1.1 Zement

Für die Herstellung der Zementleime, Mörtel und der meisten Betone wurde ein handelsüblicher Portlandzement der Festigkeitsklasse 42,5 R verwendet. Um den Einfluss der Zementart auf den Frostwiderstand der hochfesten Betone zu untersuchen, kamen zusätzlich ein Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL, ein Portlandhüttenzement CEM II/B-S sowie zwei Hochofenzemente CEM III/A und CEM III/B zum Einsatz. Die Hochofenzemente waren der Festigkeitsklasse 42,5 N zuzuordnen, während die anderen Zemente der Festigkeitsklasse 42,5 R entsprachen.

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften sowie der Hüttensandanteil der Zemente wurden entsprechend den Normen der Reihe DIN EN 196 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tafel A-1 zusammengestellt.

4.1.2 Silikastaub

Zum Einsatz kam eine Silikastaubsuspension (Slurry) mit einem Feststoffgehalt von 50 M.-%. Die Silikastaubsuspension besitzt die bauaufsichtliche Zulassung Z-3.32-1615 und entspricht zusätzlich den Anforderungen an Hauptbestandteile für Zement nach DIN EN 197-1: 2001-02. Der Wasseranteil der Silikastaubsuspension wurde bei der Mischungsberechnung als Zugabewasser berücksichtigt. Die chemische Analyse der getrockneten Silikastaubsuspension ist in Tafel A-1 im Anhang enthalten.

4.1.3 Gesteinskörnung

In den Untersuchungen fanden Rheinsand und Rheinkies mit einer Rohdichte von $2,60 \text{ kg/dm}^3$ aus dem Raum Düsseldorf Anwendung. Die groben Gesteinskörnungen erfüllten die Anforderungen der Kategorie F2 für den Frostwiderstand und die der Kategorie MS18 für den Frost-Tausalz-Widerstand nach DIN EN 12620: 2003-04. Die Sieblinie des Gesteinskörnungsgemisches lag in der Mitte des Bereichs A/B 16 nach DIN 1045-2: 2001-07.

4.1.4 Zusatzmittel

Die Konsistenz der Betone wurde mit einem handelsüblichen Fließmittel auf Basis von Naphthalinsulfonat eingestellt. Das Fließmittel entsprach DIN EN 934-2. Der Feststoffgehalt dieses in wässriger Dispersion vorliegenden Fließmittels betrug rd. 40 M.-%. Das Fließmittel wurde auch für die Mörtel und die Leimmischungen verwendet, um bei den gewählten äquivalenten Wasserzementwerten die gewünschte Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. Der Wassergehalt des Fließmittels wurde auf die Zugabewassermenge angerechnet.

4.1.5 Zugabewasser

Als Zugabewasser kam Düsseldorfer Leitungswasser zum Einsatz.

4.2 Zusammensetzung, Herstellung und Lagerung

4.2.1 Beton

Alle Betone wurden mit einem konstanten Gehalt an Zement oder Zement und Silikastaub von 500 kg/m^3 hergestellt. Bezogen auf den Zementgehalt enthielten die Betone 0, 4, 8 oder 15 M.-% Silikastaub. Hauptsächlich wurden Betone mit 0 und 8 M.-% Silikastaub untersucht, um die Ergebnisse mit vorliegenden Untersuchungen an hochfesten Betonen vergleichen zu können [Alo 02]. Die Zugabewassermenge berechnete sich mit Hilfe des äquivalenten Wasserzementwerts $(w/z)_{eq}$ nach Gleichung 4-1. Dabei wird der Gehalt an Zusatzstoffen bei der Berechnung des Zugabewassers mit einem Anrechnungsfaktor berücksichtigt. Für den verwendeten Silikastaub wurde der Anrechnungsfaktor gemäß DIN 1045-2: 2001-07 mit $k = 1$ gewählt.

$$(w/z)_{eq} = \frac{w}{z + k \cdot s} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

mit w Zugabewassergehalt in kg/m³
 z Zementgehalt in kg/m³
 s Silikastaubgehalt in kg/m³
 k Anrechnungsfaktor k = 1 für Silikastaub

Bei den untersuchten Betonen variierte der äquivalente Wasserzementwert zwischen 0,25 und 0,45. Die Zusammensetzung der Betone ist in Tafel 4-1 angegeben.

Zur Herstellung der Betone kam ein Zwangsmischer zur Anwendung. Zunächst wurde die leicht angefeuchtete Gesteinskörnung zusammen mit dem Zement kurz durchgemischt. Danach wurden 75 % des Zugabewassers und ggf. die Silikastaubsuspension zugegeben und eine Minute gemischt. Abschließend erfolgten die Zugabe des restlichen Wassers zusammen mit dem Fließmittel und weiteres Mischen mit einer Dauer von zwei Minuten. Die Probekörper für die Untersuchungen des Festbetons wurden in Stahlformen hergestellt. Die Verdichtung des Betons erfolgte auf einem Rütteltisch.

Tafel 4-1: Betonzusammensetzung und Bezeichnung

Beton	(w/z) _{eq}	Zement kg/m³	Silikastaub kg/m³	Wasser kg/m³	Zementsorte
oS45	0,45	500	0	225	CEM I 42,5 R
mS45		463	37		
oS40	0,40	500	0	200	
mS40		463	37		
oS35	0,35	500	0	175	CEM I 42,5 R CEM II/A-LL 42,5 R CEM II/B-S 42,5 R CEM III/A 42,5 R CEM III/B 42,5
mS35		463	37		
mS35/15 ¹⁾		435	65		
mS32	0,32	435	37	165	
oS30	0,30	500	0	150	
mS30/04 ¹⁾		481	19		
mS30		463	37		
oS25	0,25	500	0	125	
mS25		463	37		

¹⁾ Silikastaubgehalt in M.-% v. z

Für die Prüfung der Betondruckfestigkeit und zur Bestimmung der Luftporenkennwerte am Festbeton wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt, für die Bestimmung der Wasseraufnahme bei einem Druck von 15 MPa Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm. Für die Untersuchungen zum Frostwiderstand fanden zum einen CIF-Platten 150 mm x 110 mm x 71 mm und zum anderen Balken mit 100 mm x 100 mm x 360 mm Kantenlänge Anwendung. Die Herstellung der CIF-Platten erfolgte in Würfel-formen mit einer Kantenlänge von 150 mm, die durch Tefloneinlagen in zwei Hälften unterteilt waren.

Sämtliche Probekörper mit Ausnahme der Balken wurden entsprechend DIN EN 12390-2: 2001-06 Nationaler Anhang gelagert. Das bedeutet, dass sie

- nach der Herstellung 24 Stunden vor Feuchtigkeitsverlust und Zugluft geschützt bei 20 ± 2 °C in den Formen verblieben.
- nach dem Ausschalen 6 Tage unter Wasser bei 20 ± 2 °C und anschließend
- 21 Tage im Klimaraum bei 20 ± 2 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 ± 2 % gelagert wurden.

Zusätzlich wurde die für die Probekörper für die Prüfung des Frostwiderstands in E DIN EN 12390-9: 2002-05 vorgeschriebene Verdunstungsrate im Klima-raum von 45 ± 15 g/(m²·h) eingehalten. Die seitlichen Flächen der Probekörper wurden zwischen dem 21. und dem 26. Tag nach der Herstellung mit einem Aluminiumklebeband mit Butylkautschuk versiegelt und anschließend wieder in den Klimaraum zurückgestellt.

Die Balken wurden nach der 24-stündigen Lagerung in den Formen für 6 Tage in Folie bei 20 ± 2 °C und anschließend für 21 Tage unter Wasser bei einer Temperatur von 20 ± 2 °C gelagert.

4.2.2 Mörtel

Auf Basis der Betonzusammensetzungen wurden insgesamt 13 Mörtel mit dem Ziel konzipiert, den im Beton enthaltenen Mörtel (Zement (+ Silikastaub) + Wasser + Gesteinskörnungen ≤ 2 mm) gesondert zu untersuchen. Da das Volumen der groben Gesteinskörnung im Stoffraum durch den Mörtel ersetzt wurde, stieg in Abhängigkeit von der entsprechenden Betonzusammensetzung der Gehalt an Zement oder Zement und Silikastaub je Kubikmeter Mörtel an. Die grundlegenden Parameter der Betonzusammensetzung wie das Zement-Silikastaub-Verhältnis und der äquivalente Wasserzementwert blieben unverändert. Die Mischungszusammensetzungen und Bezeichnungen sind der Tafel A-2 zu entnehmen.

Zur Herstellung der Mörtelproben wurden ein Mörtelmischer und ein Rütteltisch nach DIN EN 196-1: 1995-05 verwendet. Das Mischregime entsprach dem der Betonherstellung. Je Mörtelzusammensetzung wurden 15 Prismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm entsprechend den vorgesehenen Prüfungen hergestellt. Die Prismen verblieben für 24 Stunden vor Feuchtigkeitsverlust und Zugluft geschützt in den Stahlformen. Anschließend erfolgten drei verschiedene Lagerungsarten (normal, trocken und nass), um den Einfluss der Nachbehandlung auf den Wassergehalt und die Wasserbindung zu untersuchen (Tafel 4-2).

Tafel 4-2: Lagerung der Mörtelprismen

Normallagerung	Trockenlagerung	Nasslagerung
1 d in Form	1 d in Form	1 d in Form
6 d unter Wasser bei $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	1 d in Nebelraum bei $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und 100 % rel. F.	27 d im Klimaraum bei $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $65 \pm 5 \text{ } \%$ rel. F.
21 d im Klimaraum bei $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $65 \pm 5 \text{ } \%$ rel. F.	26 d im Klimaraum bei $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $65 \pm 5 \text{ } \%$ rel. F.	

4.2.3 Zementleim

An 12 Zement- bzw. Zement-Silikastaub-Leimen wurde das Reaktionsverhalten des Silikastaubs während der Hydratation untersucht. Die silikastaubhaltigen Leime enthielten 8 M.-% Silikastaub bezogen auf die Zementmasse. Der äquivalente Wasserzementwert der Leime variierte zwischen 0,25 und 0,45. Die Bezeichnungen der Leime sind der Tafel A-3 zu entnehmen. Fließmittelzugaben (4.1.4) zum Zugabewasser gewährleisteten die Verarbeitbarkeit der Leime.

Das Mischen der Leime erfolgte in einem Teflontiegel. Dem Zugabewasser und ggf. der Silikastaubsuspension wurde der Zement zugegeben und mit einem Spatel rd. 3 min intensiv durchmischt. Der Leim wurde anschließend in ein PE-Röhrchen gefüllt, mit Argon überspült und luftdicht verschlossen. Er lagerte bei $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis zum Prüftermin.

4.3 Angewendete Untersuchungsmethoden und Prüfverfahren

4.3.1 Frischbetonprüfungen

Bei allen Betonen wurden die Frischbetontemperatur, die Frischbetonrohddichte und der Luftgehalt mittels Druckausgleichsverfahren im Luftporentopf gemessen und das Ausbreitmaß (d_{10}) des Frischbetons mit dem Ausbreitversuch 10 Minuten nach Mischende ermittelt. In den Fällen, bei denen sich die Betone

nicht ausreichend verflüssigen ließen, wurde zu diesem Zeitpunkt stattdessen das Verdichtungsmaß (c_{10}) mit dem Verdichtungskasten bestimmt. Die Durchführung der Prüfungen entsprach den Normen der Reihe DIN EN 12350.

4.3.2 Festigkeitsprüfungen

Am Festbeton wurden bei allen Betonen die Druckfestigkeit im Alter von 2 und 28 Tagen und die Rohdichte im Alter von 28 Tagen an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm bestimmt. Im Alter von 28 Tagen erfolgte die Prüfung der Spaltzugfestigkeit ($f_{ct,sp}$) an CIF-Platten sowie an Balken, die Prüfung der Biegezugfestigkeit ($f_{ct,BZ}$) nur an Balken. Die Durchführung der Prüfungen entsprach den Normen der Reihe DIN EN 12390.

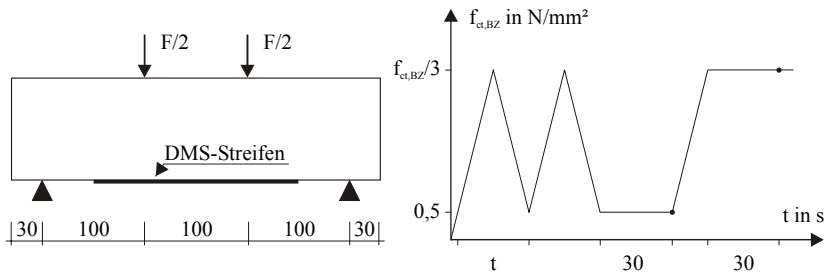


Bild 4-1: Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls

Weiterhin wurde an den Balken der statische Elastizitätsmodul (E_{stat}) als Biegezugmodul berechnet. Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12390-5: 2001-02. Die Be- und Entlastungsgeschwindigkeit entsprachen der Prüfung des statischen Elastizitätsmoduls nach DIN 1048-5: 1991-06. In Analogie zur Normprüfung betrug die obere Prüfspannung ein Drittel der zuvor bestimmten Biegezugfestigkeit (siehe Bild 4-1).

4.3.3 Prüfung des Frostwiderstands

Zur Prüfung des Frostwiderstands wurde der Frostangriff im Labormaßstab mit Hilfe des CIF-Verfahrens nach [Set 98] und des Balkenverfahrens nach [Sie 98] simuliert. Die mit diesen Prüfverfahren ermittelten Kenngrößen sind:

- der relative dynamische E-Modul,
- die Abwitterung von der Prüffläche sowie
- die Wasseraufnahme während der Prüfung.

Eine bei dieser Frostbeanspruchung eintretende innere Gefügeschädigung des Betons wird mit Hilfe des relativen dynamischen E-Moduls (RDM) festgestellt. Dabei wird der nach einer festgelegten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln bestimmte dynamische E-Modul auf den an den Probekörpern vor Beginn der Frost-Tau-Wechsel bestimmten Ausgangswert bezogen und in Prozent angegeben. Der dynamische E-Modul berechnet sich beim CIF-Verfahren aus der Ultraschalllaufzeit im Beton. Die Messungen erfolgten mit dem „Ultrasonic Concrete Tester“ der Firma Pundit. Beim Balkenverfahren wurde der relative dynamische E-Modul mit Hilfe der Resonanzfrequenzmethode berechnet. Für die Untersuchungen fand das „GrindoSonic“ Gerät MK4i der Firma I. W. Lemmens Anwendung.

Tafel 4-3: Gegenüberstellung von CIF-Verfahren und Balkenverfahren

	CIF-Verfahren [Set 98]	Balkenverfahren [Sie 98]
Vorlagerung	1 d in Form	1 d in Form
	6 d unter Wasser	6 d in Folie bei $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
	21 d im Klima $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C} / 65 \pm 5 \text{ \% rel. F.}$	21 d unter Wasser bei $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Vorbehandlung	Seitenflächen versiegelt	-
	7 d kapillares Saugen; in 10 mm demineralisiertem Wasser, 5 mm tief eingetaucht	
Einfrieren	in demineralisiertem Wasser,	an Luft
Auftauen	5 mm tief eingetaucht (Fußbad)	in Wasser

Die Wasseraufnahme während der Frostprüfung stellt eine zusätzliche Information zur Gefügesituation der Betone dar. Sie wird gravimetrisch als Differenz der Probekörpermasse nach einer festgelegten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln und der Ausgangsmasse im Alter von 28 Tagen unter Berücksichtigung der von der Prüfoberfläche abgewitterten Bestandteile bestimmt. Die Angabe der Wasseraufnahme erfolgt in Masseprozent bezogen auf die Ausgangsmasse des Probekörpers im Alter von 28 Tagen.

Neben der inneren Gefügeschädigung kann auch die Abwitterung von einer Betonoberfläche ein Maß für den Frostwiderstand sein. Mit dem CIF-Verfahren kann parallel zur Bestimmung der inneren Gefügeschädigung die Abwitterung einer definierten Prüffläche bestimmt werden. Das abgewitterte Material wird auf die Prüffläche bezogen in kg/m^2 angegeben. Mit dem Balkenverfahren ist eine quantitative Analyse der oberflächigen Abwitterung nicht möglich.

Auf Grund systematischer Untersuchungen von Auberg wurde für Beton mit hohem Frostwiderstand als Grenzwert bei der Prüfung mit dem CIF-Verfahren ein relativer dynamischer E-Modul von $\geq 60 \%$ nach 56 Frost-Tau-Wechseln vorgeschlagen [Aub 98]. Neuere Untersuchungen von Setzer zeigen, dass bereits bei einem relativen dynamischen E-Modul von 80% nach 28 Frost-Tau-Wechseln eine eindeutige Differenzierung zwischen geschädigtem und ungeschädigtem Beton möglich ist [Set 02]. Diese Erkenntnisse wurden im „Merkblatt Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau umgesetzt. Für das Balkenverfahren gibt es in Deutschland keine anerkannten Grenzwerte für die Beurteilung eines Betons mit hohem Frostwiderstand.

Beide Verfahren sind an normalfesten Betonen entwickelt worden. Da bislang für hochfeste Betone keine ausreichenden Erfahrungen zur Beurteilung des Frostwiderstands vorliegen, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit für diese Betone die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel von 56 auf 100 erhöht. Die beiden Verfahren sind in Tafel 4-3 gegenübergestellt.

4.3.4 Gefügeuntersuchungen

4.3.4.1 Mechanische Kenngrößen

Zur Charakterisierung des Betongefüges vor und nach einer Frostbeanspruchung dienten als mechanische Kenngrößen die relative Spaltzugfestigkeit, die relative Biegezugfestigkeit sowie der relative statische E-Modul. Die relativen Kenngrößen stellen das Verhältnis zwischen den mechanischen Größen der Probekörper nach der Frostbeanspruchung zu ihrem Ausgangswert 28 Tage nach der Herstellung dar (vgl. Abschnitt 4.3.2). Die Untersuchungen erfolgten nach 56 und 100 Frost-Tau-Wechseln bzw. zu dem Zeitpunkt der Prüfung mit dem CIF-Verfahren bzw. Balkenverfahren, an dem der Beton einen relativen dynamischen E-Modul von ca. 80% bzw. ca. 60% seines Ausgangswertes aufwies.

4.3.4.2 Optische Analyse an Dünnschliffen

Die Rissbildung und die Rissentwicklung wurden anhand von Dünnschliffen der Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ ohne bzw. mit 8 und 15 M.-% Silikastaub (oS35, mS35, mS35/15) beurteilt. Die Beurteilung erfolgte jeweils 28 Tage nach der Herstellung sowie zu dem Zeitpunkt der CIF-Prüfung, an dem der Beton einen relativen dynamischen E-Modul von ca. 80% bzw. ca. 60% aufwies. Die Dünnschliffe entstanden aus Probekörpern, die parallel und senkrecht zur

Prüffläche der CIF-Platten entnommen worden waren. Die Beurteilung des Gefüges fand sowohl im Fluoreszenz- als auch im Durchlichtmodus statt.

4.3.4.3 Mikroskopische Luftporenbestimmung

Die mikroskopische Luftporenbestimmung der Betone erfolgte im Alter von 28 Tagen nach DIN EN 480-11: 1999-02 mit Hilfe des Messlinienverfahrens. Mit dem Verfahren können Poren von 5 bis 6000 µm erfasst werden. Jeweils zwei Platten aus einem separat hergestellten Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm wurden nass geschliffen und poliert. Entlang einer Messstrecke von ca. 1,20 m je polierter Fläche und somit 2,40 m für jede Probe wurden Porensehnungen ausgemessen. Aus den Ergebnissen der Auszählung lassen sich die Porengrößenverteilung, der Luftgehalt, der Mikroluftporengehalt (A_{300}) sowie der Abstandsfaktor (L) berechnen.

4.3.4.4 Gesamtporosität

Im Alter von 28 Tagen wurde die Gesamtporosität ($w_{15\text{MPa}}$) mit Hilfe der Wasseraufnahme unter Druck bei 15 MPa nach Heft 422 des DAfStb [Bun 91] berechnet (Gleichung 4-2). Die Untersuchung der Betone erfolgte an gesondert hergestellten Würfeln mit einer Kantenlänge von 100 mm, während die Prüfung der Mörtel an Prismen mit einer Kantenlänge von 40 mm x 40 mm x 160 mm durchgeführt wurde.

$$w_{15\text{MPa}} = \frac{m_{15\text{MPa}} - m_d}{\rho_w \cdot V} \cdot 100 \quad \text{in Vol. - \%} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

mit	$m_{15\text{MPa}}$	Masse des bei 15 MPa gesättigten Probekörpers in g
	m_d	Masse des nach 28 Tagen bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Probekörpers in g
	ρ_w	Rohdichte des Wassers in g/cm ³
	V	Volumen des Probekörpers in cm ³

Die Gesamtporosität von Beton bzw. Mörtel stellt den offenen Porenraum dar, der z. B. bei einem Frostangriff maximal als Ausweichporenraum zur Verfügung stehen kann. Sie umfasst sowohl den Luftporenbereich als auch den Kapillar- und Gelporenbereich.

4.3.4.5 *Quecksilberdruckporosimetrie*

Die Porosität im Porenbereich von ca. $0,004\ \mu\text{m}$ bis $6\ \mu\text{m}$ wurde mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie (Hg-Porosität) mit dem Quecksilberdruckporosimeter „Porosimeter 2000 WS“ der Firma Fison Instruments bestimmt. Bei diesem Gerät wird Quecksilber mit einem Druck von bis zu 200 MPa in die Poren einer Probe eingepresst. Dabei ist der aufgebrauchte Druck umgekehrt proportional zur Porenöffnung. Unter der Annahme eines Zylinderporenmodells wurde mit Hilfe der Washburn-Gleichung aus den gemessenen Werten eine Porengrößenverteilung berechnet [Coo 99]. Der Randwinkel zwischen Quecksilber und Mörtel wurde mit $141,3^\circ$ und die Oberflächenspannung des Quecksilbers mit $0,48\ \text{N/m}$ angenommen.

Im Abschnitt 3.2.2.1 wurde erläutert, dass die Einteilung der Hg-Porosität in Gel- und Kapillarporenanteile in der Literatur unterschiedlich beschrieben ist. Auf Grund der systematischen Arbeiten von Romberg und Smolczyk [Rom 78, Smo 76] wird in der vorliegenden Arbeit als untere Grenze der Kapillarporosität ein Porenradius von $0,03\ \mu\text{m}$ festgelegt. Poren mit einem Radius $< 0,01\ \mu\text{m}$ werden zu den Gelporen gezählt. Die Poren im Bereich zwischen $0,01\ \mu\text{m}$ und $0,03\ \mu\text{m}$ stellen den Übergangsbereich von der Gel- zur Kapillarporosität dar.

Die Untersuchungen mit dem Quecksilberdruckporosimeter erfolgten sowohl am Mörtel der Betonproben als auch an den separat hergestellten Mörtelproben. Die Proben aus den Betonen entstanden durch Entnahme von Scheiben mit einer Dicke von einem Zentimeter aus dem Bereich der Prüfoberfläche sowie aus der Probekörpermitte der CIF-Platten. Anschließend wurden die Scheiben mechanisch zerkleinert und die grobe Gesteinskörnung abgetrennt. Bei den separat hergestellten Mörteln wurden die Proben aus der Mitte der Prismen entnommen. Alle Proben wurden 24 Stunden bei 10^{-3} mbar über Silikagel vakuumgetrocknet. Die Temperatur bei der Prüfung betrug 20°C . Die Messung erfolgte nach DIN 66133: 1993-06.

4.3.5 *Untersuchungen zum Wassergehalt und zur Wasserbindung*

4.3.5.1 *Bestimmung des physikalisch gebundenen Wassers*

Physikalisch gebundenes Wasser ist sowohl im Kapillarporenraum als auch im Gelporensystem eingelagert. Es kann bei 105°C aus dem Porensystem verdampft werden. An Mörtelprismen und CIF-Platten sowie an Probekörpern, an denen die Gesamtporosität nach Abschnitt 4.3.4.4 ermittelt wurde, erfolgte die Bestimmung des physikalisch gebundenen Wassers im Alter von 28 Tagen. Die Probekörper trockneten bis zur Massekonstanz im Trockenschrank bei 105°C . Das physikalisch gebundene, verdampfbare Wasser berechnet sich aus

der Differenz zwischen den Massen bei Lagerungstemperatur und Trocknung bei 105 °C. Bezogen auf das Probekörpervolumen stellt es den Feuchtegehalt (w_{28}) der Probekörper in Vol.-% dar (Gleichung 4-3).

$$w_{28} = \frac{m_{28d} - m_d}{\rho_w \cdot V} \cdot 100 \quad \text{in Vol. - \%} \quad \text{Gleichung 4-3}$$

mit	m_{28}	Masse des Probekörpers im Alter von 28 Tagen in g
	m_d	Masse des nach 28 Tagen bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Probekörpers in g
	ρ_w	Dichte des Wassers in g/cm ³
	V	Volumen des Probekörpers in cm ³

Der Gesamtfeuchtegehalt (w_n) der Probekörper während der Frostprüfung setzt sich aus dem Feuchtegehalt nach 28 Tagen (w_{28}) und der volumenbezogenen Wasseraufnahme der Probekörper während der Prüfung des Frostwiderstands (Abschnitt 4.3.3) zusammen. Das Verhältnis zwischen Gesamtfeuchtegehalt und Gesamtporosität ist der relative Porenfüllungsgrad (RPFG) des Probekörpers. Er beschreibt den Sättigungszustand des Betongefüges und ist somit maßgebend für den Frostwiderstand.

Bei der integralen Bestimmung des Feuchtegehalts (w_{28}) werden Anteile des Gelporenwassers als physikalisch gebundenes (verdampfbares) Wasser mit berücksichtigt. In Abschnitt 3.2.3 ist erläutert, dass dieses Wasser auf Grund der Porengröße der Gelporen unter dem Einfluss von Oberflächenkräften steht und deshalb bei Temperaturen bis –20 °C, wie sie bei den verwendeten Frostprüfverfahren erreicht werden, nicht gefrieren kann [Bru 77, Sto 79]. Die Berücksichtigung des Gelporenwassers als gefrierbares Wassers ist dennoch notwendig, da es durch thermodynamische Ungleichgewichte mobilisiert und zum makroskopischen Eis transportiert werden kann [Lit 72, Set 02] (siehe Abschnitt 3.2.3).

4.3.5.2 Bestimmung des chemisch gebundenen Wassers

Ein bestimmter Anteil des Zugabewassers wird durch die Zementhydratation chemisch gebunden. Dieses chemisch gebundene Wasser berechnet sich aus dem Masseverlust zwischen 105 °C und 950 °C. Hierzu wurden die bis zur Massekonstanz bei 105 °C getrockneten Proben bei ca. 950 °C gegläht.

4.3.5.3 Bestimmung der Feuchtigkeitsverteilung mittels Multi-Ring-Elektrode

Der elektrolytische Widerstand des Betons lässt sich mit der Multi-Ring-Elektrode über den Querschnitt der Probekörper bestimmen. Er ist proportional zu seinem Wassergehalt [Büc 96]. Die verwendete Multi-Ring-Elektrode wurde vom Institut für Bauforschung der RWTH Aachen entwickelt [Bre 93]. Sie besteht aus neun 2,5 mm breiten Edelmetallringen. Diese sind elektrisch voneinander isoliert und in einem Abstand von jeweils 2,5 mm übereinanderliegend angeordnet. Zwischen jeweils zwei benachbarten Edelmetallringen wird der elektrolytische Widerstand bestimmt (Bild 4-2).

In zwei Probekörpern mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ ohne (oS35) bzw. mit 8 M.-% Silikastaub (mS35) wurden je zwei Multi-Ring-Elektroden und eine tiefenabhängige Temperatursonde einbetoniert (Bild 4-3). Die Anordnung der Multi-Ring-Elektroden erfolgte so, dass über den gesamten Querschnitt von ca. 72 mm die Elektrolytwiderstände im Abstand von 5 mm aufgezeichnet werden konnten. Der erste Messwert wurde in einem Abstand von 5 mm von der Prüfoberfläche aufgenommen. Die Untersuchungen wurden am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen durchgeführt.

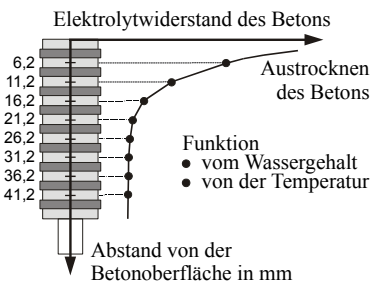


Bild 4-2: Messprinzip der Multi-Ring-Elektrode [Sch 95]

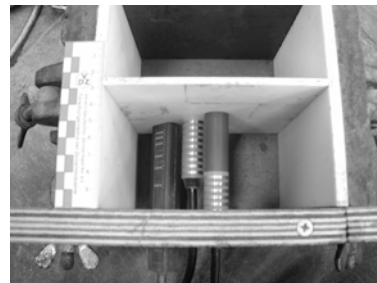


Bild 4-3: Einbau der Multi-Ring-Elektrode und des Temperatursensors

Ein Computer steuerte die Messung und die Aufzeichnung der Elektrolytwiderstände und der Temperatur. Die Prüfung wurde mittels Wechselstrommessung bei einer Messfrequenz von 108 Hz und einer maximalen Messspannung von 1 V durchgeführt. Da der elektrische Widerstand temperaturabhängig ist, fand eine Temperaturkorrektur der Widerstandsmessung mit Hilfe der Arrhenius-Gleichung (Gleichung 4-4) statt [Büc 96, Rau 02].

$$R = R_0 \cdot e^{3000(1/273 - 1/T_0)}$$

Gleichung 4-4

mit R Elektrolytwiderstand bei 20°C in Ω
 R_0 Elektrolytwiderstand bei Isttemperatur T_0 in Ω
 T_0 Isttemperatur in K

4.3.5.4 Bestimmung der Feuchtigkeitsverteilung mittels dreidimensionaler Computertomographie

Bei der Computertomographie wird die innere Struktur, also das Gefüge eines Körpers, zerstörungsfrei und orts aufgelöst an Hand von Absorptionsbildern rekonstruiert. Dabei befindet sich der zu untersuchende Körper zwischen einer kurzwelligen, energiereichen Strahlenquelle und einem Detektor, der die Intensität der auf der Rückseite austretenden Strahlung erfasst (siehe Bild 4-4). Einen Überblick über die Entwicklung der hochauflösenden dreidimensionalen Computertomographie in Deutschland gibt [Rie 93].

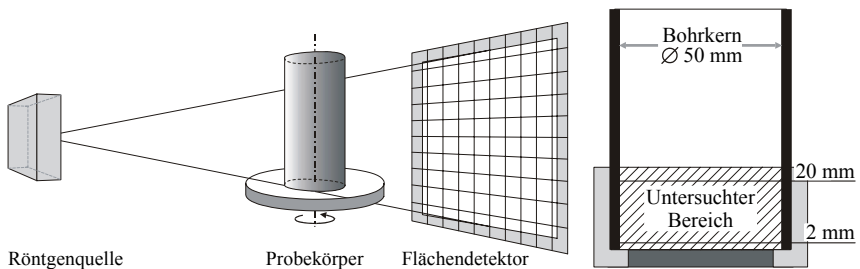


Bild 4-4: Prinzipschema 3D-Computertomographie

Die Probekörper wurden in einer Mikrofokusanlage der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchstrahlt. Die Strahlenquelle, ein Mikrofokus Röntgenstrahler besaß eine Leistung von 320 kV. Die durch Abbremsen beschleunigter Elektronen entstehende Röntgenstrahlung wird beim Durchdringen des Probekörpers weder gebrochen noch abgelenkt – nur durch Absorption und Streuung abgeschwächt. Die Schwächung wird mit dem Absorptionsgesetz von Lambert und Beer beschrieben (Gleichung 4-5).

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

Gleichung 4-5

mit: I Intensität der Strahlung nach Materialdurchgang in W/m^2
 I_0 Intensität der Strahlenquelle in W/m^2

μ materialspezifischer Absorptionskoeffizient
 d Dicke des zu durchdringenden Materials

Der materialspezifische Absorptionskoeffizient μ ist u. a. stark von der durchstrahlten Materie, also von seiner Dichte abhängig. Die Strahlungsintensität nimmt exponentiell mit der Dichte des Materials und seiner Dicke ab. Sie wird durch einen Flachdetektor aus amorphem Silicium direkt in elektrische Signale umgewandelt und in Grauwerte umgesetzt. Durch die Verwendung eines α -Si Flachdetektors mit 1024 x 1024 Pixeln konnte der Durchmesser des Probekörpers simultan erfasst werden (siehe Bild 4-4). Für die computer-gestützte, tomographische Rekonstruktion müssen von dem Prüfkörper Absorptionsbilder aus verschiedenen Richtungen aufgenommen werden. Hierfür wurde der Probekörper einmal um seine Achse gedreht, wobei insgesamt 360 Bilder aufgezeichnet wurden. Die Leistungsfähigkeit der Anlage zur Darstellung des Mikrogefüges von Beton sowie Feuchtigkeitstransportvorgänge wurde u. a. von Weise nachgewiesen [Wei 05].

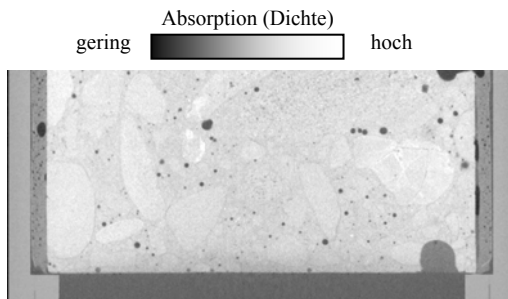


Bild 4-5: 3D-CT Absorptionsbild des Querschnitts von Beton mS35 nach 42 Frost-Tau-Wechseln

Bild 4-5 zeigt exemplarisch die tomographische Rekonstruktion des Bohrkernquerschnitts des Betons mS35 nach 42 Frost-Tau-Wechseln. Gut ist die räumliche Verteilung der Zementsteinmatrix, der Gesteinskörnung aber auch der Luftporen und der Feuchtigkeit erkennbar. Die Vergrößerung und die Ortsauflösung ergibt sich aus dem Abstand des Probekörpers zur Strahlenquelle und zum Flächendetektor sowie der Größe des Probekörpers und des Flächendetektors. Mit der gewählten 3D CT-Anlage und der Probekörpergröße (Bohrkern \varnothing 50 mm) wurde eine Auflösung von maximal 40 μ m erreicht.

4.3.6 Untersuchungen zum Reaktionsverhalten des Silikastaubs

4.3.6.1 Abstoppen der Hydratation

Die Hydratation noch nicht erhärteter Zementleime wurde durch Aufrühren mit Aceton abgestoppt. Erstarrte bzw. noch nicht vollständig erhärtete Zementstein-

bzw. Mörtelproben wurden mit Aceton bedeckt und analysenfein aufgemahlen. Eine an einem Büchnertrichter mit Blaubandfilter angeschlossene Vakuumpumpe saugte in beiden Fällen das Aceton ab. Die Proben wurden dreimal mit Diethylether gespült, um anhaftendes Aceton von den Proben zu entfernen. Die so abgestopften Proben lagerten bis zur Prüfung dicht verschlossen und mit Argon überspült im Klimaraum bei $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

4.3.6.2 Simultane Thermoanalyse (STA)

Bei der simultanen Thermoanalyse wird an einer Probe während eines definierten Aufheizprogramms neben der Gewichtsänderung mit einer Thermo- waage (Thermogravimetrie) die Wärmefreisetzung bzw. die Wärmeaufnahme (Differenz-Thermoanalyse) bestimmt, wodurch temperaturabhängige Phasen- umwandlungen und Phasenzersetzungen qualitativ und die Masseänderung quantitativ erfasst werden können. Die Untersuchungen erfolgten mit dem Gerät STA 501 der Fa. Bähr.

Für die Untersuchungen wurden ca. 80 mg des nach Abschnitt 4.3.6.1 abge- stoppten Zementsteins in einen Tiegel eingewogen und mit 10 K/min in N_2 - Atmosphäre bis auf eine maximale Temperatur von 1000°C erhitzt. Beim Aufheizen verweilte die Probe eine Stunde bei einer Temperatur von 100°C , um noch eventuell anhaftende Diethyletherreste oder Wasser zu entfernen.

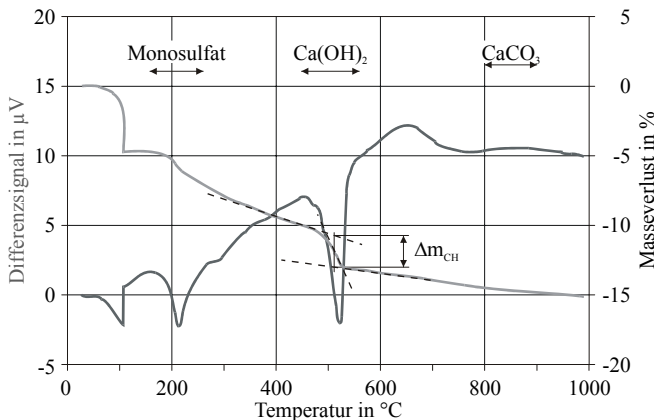


Bild 4-6: STA-Analyse eines Portlandzementes nach 28 d

Die Entwässerung des Calciumhydroxids findet bei 400°C bis 500°C und die Entsäuerung des Calciumcarbonats bei 800°C bis 900°C statt (Bild 4-6). Dagegen entwässern die CSH-Phasen während des Aufheizens relativ konti-

nuierlich. Mit Hilfe eines Tangentenmodells wurde die Entwässerung der CSH-Phasen bei der Berechnung des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalts berücksichtigt [Mar 88].

4.3.6.3 Bestimmung des Anteils reagierten Silikastaubs

Die Ermittlung des Anteils an reagiertem Silikastaub (A_r) erfolgte in Anlehnung an das in DIN V ENV 196-4: 1993-11 beschriebene Verfahren zur quantitativen Bestimmung des Flugascheanteils in Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen. Die Untersuchungen erfolgten an Zementsteinproben im Alter von 28 Tagen nach der Herstellung. Hierbei werden der Klinker sowie der überwiegende Teil der Hydratationsprodukte durch den Aufschluss in einem Gemisch aus Methanol, Salz- und Salicylsäure (MSS) gelöst. Der zurückbleibende unlösliche Rückstand enthält unreaktierten Silikastaub und Erstarrungsregler.

Die Hydratation der zu untersuchenden Proben wurde nach Abschnitt 4.3.6.1 abgestoppt. Nach dem Trocknen bei 105 °C wurden zwei Gramm unter ständigem Rühren in ein Becherglas mit 200 ml des MSS-Säuregemisches gegeben. Das Gemisch wurde bei Raumtemperatur 30 min gerührt und anschließend über einen vorab ausgewogenen Glasfilter abfiltriert. Der Filter mit dem unlöslichen Rückstand trocknete bei 105 °C bis zur Massekonstanz und wurde im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt und anschließend ausgewogen.

$$A_r = \frac{s}{z + s} \cdot 100\% - \left(R_{z+s} - \left(1 - \frac{s}{z + s} \right) \cdot R_z \right) \quad \text{Gleichung 4-6}$$

mit	A_r	reagierter Anteil des Silikastaubs in % der Einwaage
	s, z	Gehalt an Silikastaub bzw. Zement in g
	R_{z+s}	Rückstand der silikastaubhaltigen Zementsteinprobe in %
	R_z	Rückstand des Referenzportlandzements in %

Der reagierte Anteil des Silikastaubs nach 28 Tagen Hydratation berechnet sich nach Gleichung 4-6, wobei die Rückstände jeweils auf den geglähten Feststoff bezogen wurden.

4.3.6.4 Rasterelektronenmikroskopie

Die getrockneten, unlöslichen Rückstände, die nach dem MSS-Aufschluss zurückblieben, wurden rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Es kam ein „Environmental Scanning Electron Microscope“ (ESEM) vom Typ Philips XL 30 ESEM-FEG zum Einsatz, das mit einem semiquantitativen, energiedis-

persiven Röntgenspektrometer (EDX) vom TYP DX 4 der Fa. EDAX ausgestattet ist. Die Analysen erfolgten an Streupräparaten aus den Rückständen der hydratisierten und im Methanol, Salz- und Salicylsäure Gemisch aufgeschlossenen Proben. Mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops konnte die Morphologie der Rückstände charakterisiert werden, während das Röntgenspektrometer zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Rückstände zum Einsatz kam.

4.3.6.5 Nuclear Magnetic Resonance Spektroskopie (NMR-Spektroskopie)

Strukturelle Eigenschaften einzelner Atome in einem Kristallgitter können mit der nuklearen magnetischen Resonanzspektroskopie (NMR-Spektroskopie) untersucht werden. In einem starken homogenen Magnetfeld von 1 bis 10 Tesla wird eine Probe zusätzlich einem elektromagnetischen Wechselfeld ausgesetzt, dessen Frequenz im Megahertzbereich liegt. Es wird die Differenz der Resonanzfrequenzen eines magnetisch aktiven Atomkerns und der Standardverbindung für dieses Isotop als chemische Verschiebung δ gemessen. In Festkörpern gibt es bei der NMR-Spektroskopie verschiedene Effekte, die zu einer Verbreiterung der gemessenen Peaks führen. Um diese Effekte zu minimieren, wird die Probe um eine Achse rotiert, deren Winkel $54,7^\circ$ zu dem äußeren homogenen Magnetfeld liegt (siehe Bild 4-7). Diese Versuchsanordnung heißt magic angel spinning (MAS). Die Grundlagen zur NMR-Spektroskopie sind u. a. in [Fri 92] eingehend dargestellt. Zusammenfassungen über den Stand der Festkörper-NMR finden sich u. a. in [Ber 03, Ebr 03].

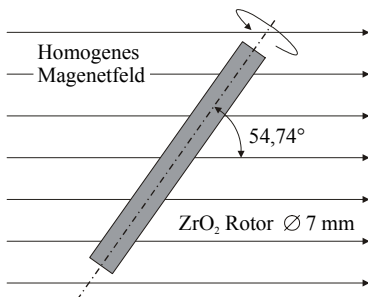


Bild 4-7: Lage des Rotors bei der MAS NMR

In der vorliegenden Arbeit wurden die Zementsteine mit dem Isotop ^{29}Si untersucht. Die chemische Verschiebung der Si-Atome ist u. a. stark abhängig von der Anzahl der Siloxan-Brücken (Si-O-Si) bzw. der Silanol-Gruppen (Si-OH). Deshalb können das C_3S , das C_2S und der Silikastaub sowie deren Reaktionsprodukte, das CSH, bestimmt werden. Die unterschiedlich gebun-

denen Siliciumatome werden über die Anzahl der Siloxan-Brücken und Silanol-Gruppen in (Q^0) bis (Q^4)-Gruppen entsprechend Tafel 4-4 unterteilt.

Tafel 4-4: Einteilung der Siliciumatome in (Q^n)-Gruppen sowie deren Darstellung [Jus 98] und chemische Verschiebung

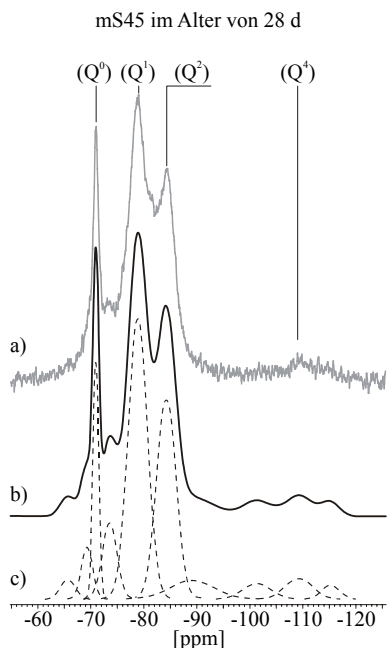
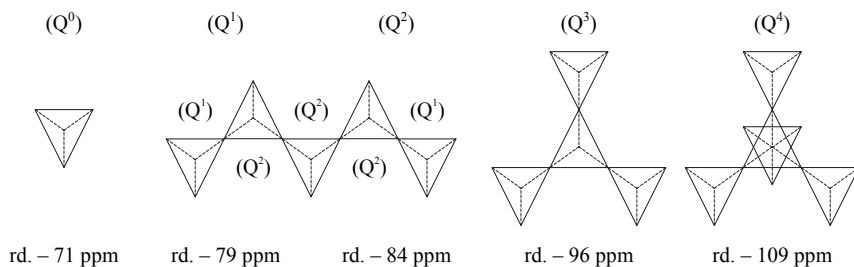


Bild 4-8: Auswertung des ^{29}Si -NMR-Spektrums am Beispiel des Leims mS45 im Alter von 28 Tagen
a) Originalspektrum
b) geglättetes Spektrum (line broadening)
c) dekomponiertes Spektrum

Die NMR-Untersuchungen erfolgten an der Universität Tübingen an einem Solid-state High-resolution 300 MHz ASX300 der Fa. Bruker in der MAS-Versuchsanordnung. Zum Einsatz kamen 7 mm ZrO_2 -Rotoren mit einer Rotationsfrequenz von 4 kHz. Insgesamt wurden von jeder Probe 1536 Scans durchgeführt.

Um eine quantitative Auswertung der NMR-Spektroskopie zu ermöglichen, wurde auf das Originalspektrum (Bild 4-8 a)) eine exponentielle Linien-erweiterung (line broadening) (Bild 4-8 b)) von 5 Hz auf das jeweilige Empfängersignal angewandt. Dadurch konnte ohne wesentliche Verfälschung der Linienbreiten eine bessere Anpassung der Teillinien vorgenommen werden. Im Anschluss wurde mit Hilfe einer Fouriertransformation das bearbeitete Spektrum dekomponiert (Bild 4-8 c)).

5 Darstellung und Erörterung der Untersuchungsergebnisse

5.1 Frischbetoneigenschaften

Die Frischbetoneigenschaften der Betone sind im Anhang der Tafel A-4 zu entnehmen. Die Frischbetonrohddichte der Betone lag auf Grund des variierenden äquivalenten Wasserzementwertes sowie des Einsatzes von Silikastaub im Bereich zwischen 2,29 – 2,43 kg/dm³. Der Luftporengehalt, der ebenso wie die Frischbetonrohddichte mit dem Druckausgleichsverfahren bestimmt wurde, lag zwischen 0,9 und 3,1 Vol.-%. Durch unterschiedliche Mengen an Fließmittel wurden die Betone auf eine weiche (F3) bis sehr weiche (F4) Konsistenz eingestellt. Trotz hoher Fließmittelmengen wiesen die Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,25$ eine Konsistenz der Klasse C0 bzw. C1 auf. Auf eine weitere Fließmittelzugabe wurde verzichtet, um eine Entmischung der Betone zu vermeiden.

5.2 Festigkeits- und Verformungseigenschaften

Die Festigkeits- und Verformungseigenschaften sind Tafel A-5 zu entnehmen. Bild 5-1 enthält die Druckfestigkeit der Betone im Alter von 2 und 28 Tagen. Wie bei den Untersuchungen von Alonso [Alo 02] war zwei Tage nach der Herstellung kein signifikanter Unterschied in der Druckfestigkeit zwischen den Betonen ohne und mit Silikastaub zu erkennen.

Im Alter von 28 Tagen lag die Druckfestigkeit ($f_{cm,28}$) der Betone zwischen 65 und 117 MPa. Bei gleichem äquivalenten Wasserzementwert erhöhte sich durch den Einsatz von 8 M.-% Silikastaub die Druckfestigkeit der Betone deutlich. Lediglich bei einem $(w/z)_{eq}$ von 0,45 wurde keine Steigerung der Druckfestigkeit durch den Einsatz von Silikastaub festgestellt. Die Druckfestigkeit des Betons ohne Silikastaub und $(w/z)_{eq} = 0,25$ war im Alter von 28 Tagen mit 93 N/mm² relativ niedrig, da sich der Beton infolge der sehr steifen Konsistenz (Konsistenzklasse C0) schwerer verdichten ließ als die anderen Betone mit weicherer Konsistenz. Gegenüber dem Beton ohne

Silikastaub und $(w/z)_{eq} = 0,30$ konnte die 28 d Druckfestigkeit nicht gesteigert werden.

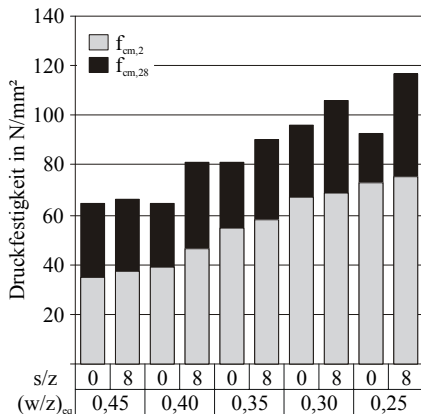


Bild 5-1: Druckfestigkeit der Betone nach 2 und 28 Tagen

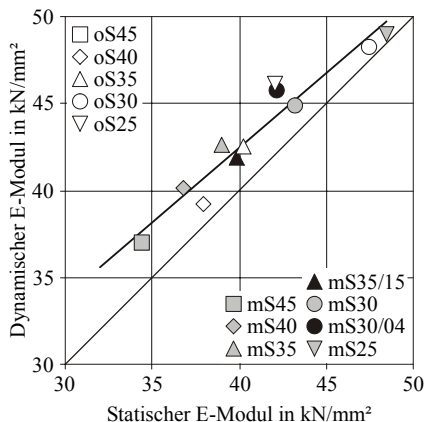


Bild 5-2: Zusammenhang zwischen dynamischem und statischem E-Modul

Der statische (E_{stat}) und der dynamische (E_{dyn}) E-Modul der Betone nahmen erwartungsgemäß bei gleicher Gesteinskörnung mit sinkendem $(w/z)_{eq}$ zu. Der dynamische E-Modul war größer als der statische E-Modul (Bild 5-2). Dies ist auf die Definition des dynamischen E-Moduls als Tangentenmodul bzw. des statischen E-Moduls als Sehnensmodul zurückzuführen. Die Differenz zwischen beiden Werten nahm mit fallendem $(w/z)_{eq}$ und damit mit steigender Druckfestigkeit und steigendem E-Modul geringfügig ab. Grund hierfür ist der mit steigender Festigkeit fast bis zum Bruch reichende lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung.

5.3 Frostwiderstand

5.3.1 CIF-Verfahren

Im Rahmen der Prüfung mit dem CIF-Verfahren wurden neben dem relativen dynamischen E-Modul (RDM) die Abwitterung, die 7-tägige kapillare Wasseraufnahme (w_{cap}) sowie die Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel (w_f) für die einzelnen Betone bestimmt. Die Ergebnisse sind den Tafeln A-6 bis A-8 zu entnehmen.

Die kapillare Wasseraufnahme aller Betone mit $(w/z)_{eq} < 0,45$ war mit Werten zwischen 0,6 M.-% und 0,1 M.-% sehr gering und nahm mit sinkendem äquivalenten Wasserzementwert erwartungsgemäß ab (Bild B-2). Betone ohne

Silikastaub nahmen während der 7-tägigen Wasserlagerung ungefähr so viel Wasser kapillar auf wie die entsprechenden Betone mit Silikastaub. Die geringe Wasseraufnahme deutet auf ein dichtes, porenarmes Gefüge hin. Nur der Beton ohne Silikastaub mit $(w/z)_{eq} = 0,45$ nahm mit 1,0 M.-% mehr Wasser kapillar auf als der entsprechende Beton mit Silikastaub (0,7 M.-%). Alle Betone wiesen unabhängig von ihrer Zusammensetzung nur sehr geringe Abwitterungen auf (Tafel A-6 und Bild B-1). Während der anschließenden Frost-Tau-Wechsel zeigten sich gravierende Unterschiede in der Wasseraufnahme und im relativen dynamischen E-Modul zwischen den Betonen ohne und mit Silikastaub.

Bild 5-3 zeigt die Wasseraufnahme der CIF-Platten während der Frost-Tau-Wechsel. Die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls für die hochfesten Betone ist Bild 5-4 zu entnehmen. In beiden Bildern enthält das linke Diagramm die Ergebnisse der Betone ohne Silikastaub, während das rechte Diagramm die der silikastaubhaltigen Betone darstellt.

Die Wasseraufnahme der Betone ohne Silikastaub wies während der 100 Frost-Tau-Wechsel einen degressiven Verlauf auf. Sie nahm erwartungsgemäß mit sinkendem äquivalenten Wasserzementwert ab (Bild 5-3 links). Die Entwicklung der Wasseraufnahme und die Menge an aufgenommenem Wasser deuteten darauf hin, dass das Gefüge der Betone durch den Frostangriff während der Prüfung nicht geschädigt wurde. Die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls bestätigte dies. Während der 100 Frost-Tau-Wechsel fiel der relative dynamische E-Modul der Betone bei $(w/z)_{eq} = 0,45$ auf 78 % des Ausgangswertes und bei $(w/z)_{eq} \leq 0,40$ praktisch nicht mehr ab (Bild 5-4 links).

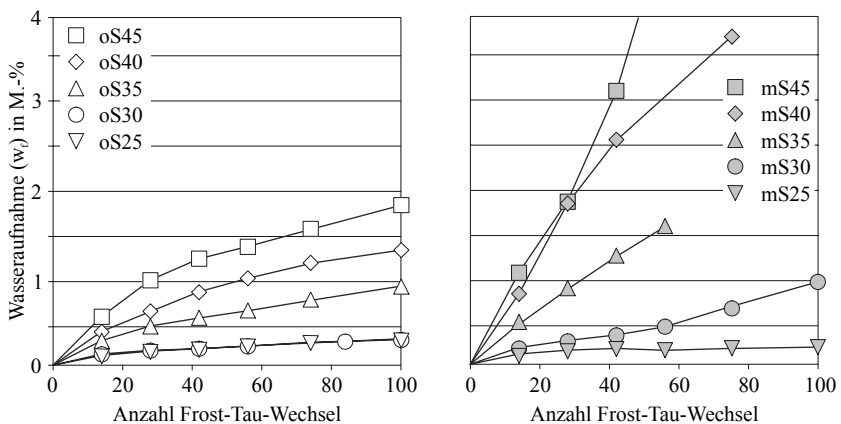


Bild 5-3: Wasseraufnahme (w_t) in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (CIF-Verfahren): links Betone ohne Silikastaub; rechts Betone mit 8 M.-% Silikastaub

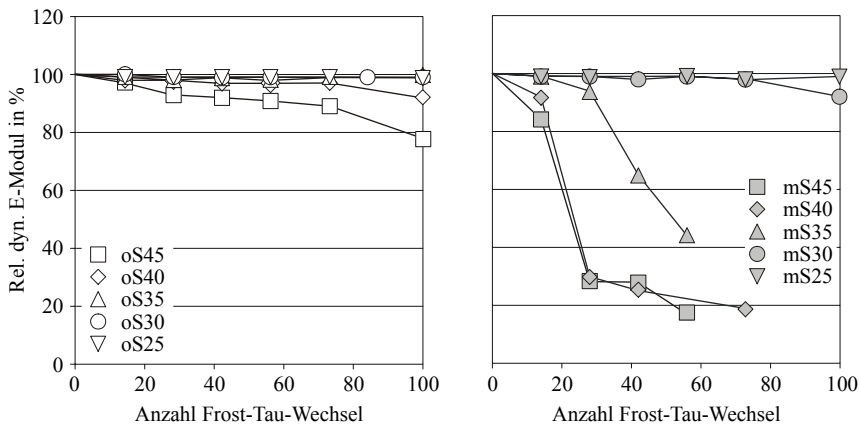


Bild 5-4: Relativer dynamischer E-Modul in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (CIF-Verfahren): links Betone ohne Silikastaub; rechts Betone mit 8 M.-% Silikastaub

Dagegen nahmen die silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq}$ zwischen 0,35 und 0,45 schon nach rund 14 Frost-Tau-Wechseln ca. doppelt so viel Wasser auf wie die vergleichbaren Betone ohne Silikastaub (Bild 5-3 rechts). Diese hohe Wasseraufnahme ließ eine Schädigung des Betongefüges vermuten. Im weiteren Verlauf der Prüfung stieg die Wasseraufnahme deutlich und kontinuierlich an. Dieser Verlauf deutete auf eine zunehmende Gefügestörungen hin. Entsprechend fiel der relative dynamische E-Modul der Betone schon nach den ersten Frost-Tau-Wechseln deutlich ab (Bild 5-4 rechts). Wie Bild 5-5 zeigt, war das Gefüge dieser Probekörper nach 56 Frost-Tau-Wechseln vollständig zerstört.



Bild 5-5: CIF-Platte mit $(w/z)_{eq}$ 0,45 und 8 M.-% Silikastaub (mS45) nach 56 Frost-Tau-Wechseln

Das Verhalten der silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,30$ und $0,25$ unterschied sich von denen mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ grundlegend. Die Wasseraufnahme war während der Frostprüfung gering und der relative dynamische E-Modul blieb

auch nach 100 Frost-Tau-Wechseln praktisch unverändert. Die Betone wiesen einen hohen Frostwiderstand auf (siehe Bild 5-3 und Bild 5-4 jeweils rechts).

Solange das Gefüge der silikastaubhaltigen Betone ungeschädigt blieb, nahmen diese Betone ähnlich viel Wasser während der ersten Frost-Tau-Wechsel auf wie die vergleichbaren hochfesten Betone ohne Silikastaub (siehe Bild 5-3 rechts).

Die innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel voranschreitende starke Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls der silikastaubhaltigen Betone, die mit einer vollständigen Zerstörung des Gefüges einherging, war insofern überraschend, als das die Ergebnisse zur kapillaren Wasseraufnahme dieses Verhalten nicht erwarten ließen. Die kapillare Wasseraufnahme dieser Betone war gering und unterschied sich nicht signifikant von der der anderen Betone. Deshalb wurden einige Versuche wiederholt, um die Plausibilität der Ergebnisse zu

überprüfen. Die Ergebnisse waren, wie in Bild 5-6 dargestellt, weitgehend reproduzierbar.

Es muss berücksichtigt werden, dass zum einen durch herstellungsbedingte Einflüsse der Luftgehalt im Frischbeton variiert und zum anderen die Prüfstreuungen bei starken Änderungen des relativen dynamischen E-Moduls deutlich ansteigen [Aub 98, Sie 99]. Insgesamt bestätigten jedoch die Ergebnisse bereits vorliegende Erfahrungen aus Laborversuchen und Auslagerungsuntersuchungen anderer Wissenschaftler [u. a. Mal 87, Oka 81, Pal 04, Pet 03, Utg 04].

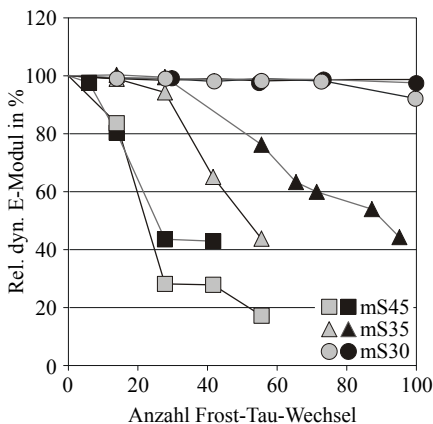


Bild 5-6: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zum Frostwiderstand mit dem CIF-Verfahren

5.3.2 Balkenverfahren

Parallel zum CIF-Verfahren wurde der Frostwiderstand der Betone auch mit dem Balkenverfahren untersucht. Dabei sollte überprüft werden, ob der Frostwiderstand mit verschiedenen Prüfverfahren ähnlich bewertet wird. Verfahrensbedingt kann die oberflächige Abwitterung der Betone mit dem Balkenverfahren nicht quantitativ erfasst werden. Die Betonoberflächen wurden jedoch visuell beurteilt und bestätigten die Ergebnisse des CIF-Verfahrens. Die Abwitterungen waren vernachlässigbar gering. Die Ergebnisse des relativen dynamischen E-Moduls und der Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel sind den Tafeln A-9 und A-10 zu entnehmen.

Bild 5-7 zeigt, dass der relative dynamische E-Modul der Betone ohne Silikastaub sowie mit Silikastaub und $(w/z)_{eq} < 0,35$ während der Frostbeanspruchung praktisch unverändert blieb. An den Balken wurde während der Frost-Tau-Wechsel jedoch ein Masseverlust festgestellt. Da die Betonoberfläche praktisch nicht abwitterte, musste der Masseverlust auf eine Wasserabgabe (Verdunstung) zurückzuführen sein. Ursache hierfür ist die verfahrensbedingt hohe Luftumwälzung in der Truhe, da die Befrostung an der Luft erfolgt (siehe Tafel 4-3). Diese Luftumwälzung ist notwendig, um das vorgeschriebene Temperaturregime beim Einfrieren der Balken einzuhalten [Sie 98]. Dadurch verdunstet bei den ungeschädigten Betonen mehr Wasser von der Oberfläche als während des Auftauvorgangs in 20 ± 2 °C warmen Wasser aufgenommen wird.

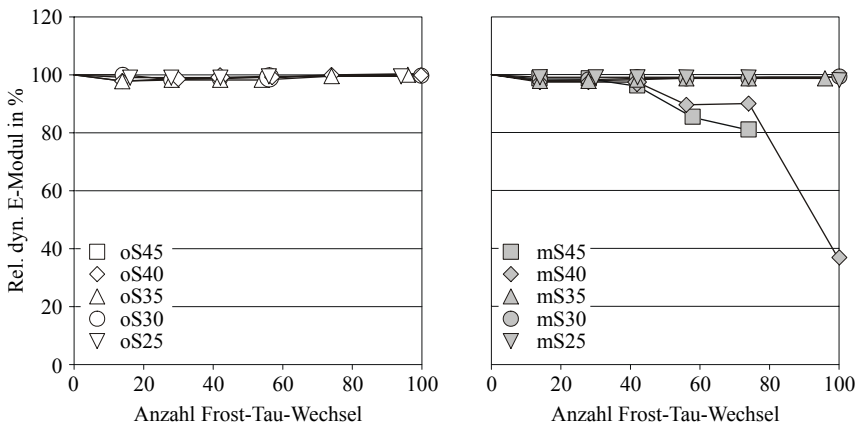


Bild 5-7: Relativer dynamischer E-Modul in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (Balkenverfahren): links Betone ohne Silikastaub; rechts Betone mit 8 M.-% Silikastaub

Für die silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,40$ und $0,45$ trat nach 56 Frost-Tau-Wechseln nur ein geringer Abfall des relativen dynamischen E-Moduls auf. Nach 100 Frost-Tau-Wechseln waren die Probekörper auch bei diesem Prüfverfahren deutlich geschädigt (Bild 5-7 rechts). Wie in Bild 5-8 zu sehen ist, trat die Schädigung im allgemeinen an den Balkenenden auf. Sie ging mit einer für dieses Verfahren deutlichen Wasseraufnahme einher, die jedoch im Vergleich zum CIF-Verfahren gering war (Bild B-3 rechts).



Bild 5-8: Geschädigter Probekörper mS40 nach 100 Frost-Tau-Wechseln

Lediglich am Beton mit Silikastaub und $(w/z)_{eq} = 0,35$ wurde der Frostwiderstand mit den beiden Frostprüfverfahren unterschiedlich bewertet. Auch nach 100 Frost-Tau-Wechseln wurde mit dem Balkenverfahren an diesem hochfesten Beton praktisch keine Änderung des relativen dynamischen E-Moduls infolge der Frostbeanspruchung festgestellt, während das Gefüge der Probekörper im CIF-Verfahren nach 56 Frost-Tau-Wechseln zerstört war.

5.3.3 Zusammenfassung

An allen untersuchten hochfesten Betonen war während der Prüfung bei keinem der beiden Laborfrostprüfverfahren eine Schädigung der Oberfläche in Form von Abwitterungen oder „Pop-outs“ festzustellen. Zum Teil traten jedoch deutliche Unterschiede bei der Änderung des relativen dynamischen E-Moduls auf, mit der bei beiden Prüfverfahren eine inneren Gefügeschädigung festgestellt wird. Der relative dynamische E-Modul fiel bei den silikastaubhaltigen Betonen mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ (CIF-Verfahren) bzw. $\geq 0,40$ (Balkenverfahren) zum Teil schon nach wenigen Frost-Tau-Wechseln deutlich ab. Dagegen wiesen sämtliche Betone ohne Silikastaub und die silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq} < 0,35$ keine bzw. nur geringe Änderungen des relativen dynamischen E-Moduls selbst nach 100 Frost-Tau-Wechseln auf.

Daraus folgt, dass die innere Schädigung, d. h. die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls bei den untersuchten hochfesten Betonen die maßgebende Größe für die Beurteilung des Frostwiderstands darstellt.

5.4 Bedeutung des relativen dynamischen E-Moduls zur Charakterisierung des Gefüges

5.4.1 Festigkeitsparameter

Nach 56 und 100 Frost-Tau-Wechseln wurden parallel zur Messung des relativen dynamischen E-Moduls die Biegezug- und die Spaltzugfestigkeit bestimmt, um zu überprüfen, in wie weit eine Gefügeschädigung mit einer Abnahme mechanischer Kenngrößen einhergeht. Zusätzlich wurden bei zwei Serien (mS35 und mS35/15) die Untersuchungen nach einem Abfall des relativen dynamischen E-Moduls auf ca. 80, 60 und 40 % seines Ausgangswertes durchgeführt.

An den im Balkenverfahren untersuchten Probekörpern der hochfesten Betone wurden sowohl die Biegezug- als auch die Spaltzugfestigkeit bestimmt. Auf Grund der Probekörpergeometrie wurde an den CIF-Platten (ca. 150 mm x 110 mm x 72 mm) nur die Spaltzugfestigkeit geprüft. Die Ergebnisse sind der Tafel A-11 des Anhangs zu entnehmen. Die Festigkeiten wurden jeweils auf die Ausgangswerte 28 Tage nach der Herstellung bezogen und als relative Biegezug- bzw. relative Spaltzugfestigkeit angegeben. In Bild 5-9 sind beide Relativgrößen (siehe Abschnitt 4.3.4.1) in Abhängigkeit des äquivalenten Wasserzementwertes und des Silikastaubgehalts gegenübergestellt.

Unabhängig von der Betonzusammensetzung und der Dauer der Frostbeanspruchung können in beiden Bildern zwei Bereiche unterschieden werden. Im ersten Bereich wurde eine z. T. deutliche Änderung des Relativwertes des Festigkeitsparameters (Biegezug- bzw. Spaltzugfestigkeit) festgestellt, obwohl der relative dynamische E-Modul der Probekörper annähernd unverändert blieb. Diese Gefügeveränderung war bis zu einem Relativwert des Festigkeitsparameters von ca. 60 % nicht aus der Entwicklung des relativen dynamischen E-Moduls erkennbar. Im zweiten Bereich – ab etwa 60 % der ursprünglich vorhandenen Biegezug- bzw. Spaltzugfestigkeit – nahm der Relativwert mit weiter sinkendem relativen dynamischen E-Modul annähernd linear ab. In jedem Fall war der relative dynamische E-Modul größer als die zum gleichen Zeitpunkt bestimmte relative Biegezug- bzw. Spaltzugfestigkeit. Dies steht im Einklang zu Untersuchungen u. a. von Lohaus und Petersen [Loh 02, Pet 03a], die zu vergleichbaren Ergebnissen bezüglich des Verhältnisses zwischen relativem dynamischen E-Modul und Biegezugfestigkeit bzw. Diffusionswiderstand kamen.

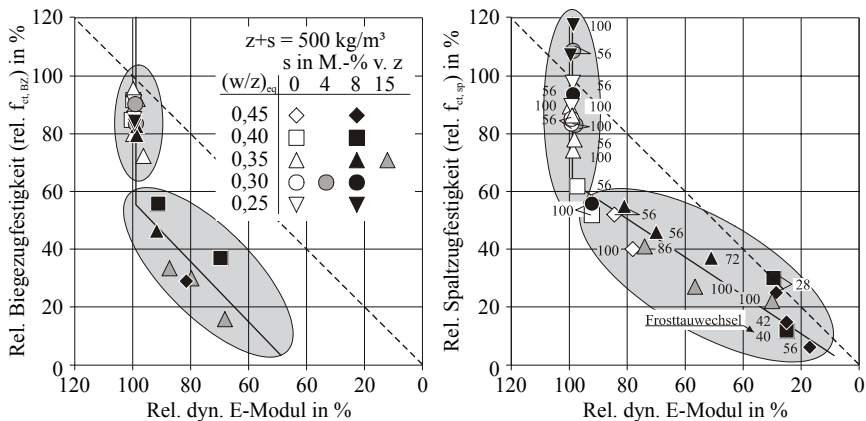


Bild 5-9: Zusammenhang zwischen relativem dynamischen E-Modul und links: relativer Biegezugfestigkeit der Balken (Balkenverfahren); rechts: relativer Spaltzugfestigkeit der CIF-Platten (CIF-Verfahren)

Die im Vergleich zum relativen dynamischen E-Modul starke Abnahme der Festigkeit kann wie folgt erklärt werden: Die Zugfestigkeit der Betone wird durch Mikrorisse in der Matrix bzw. in der Kontaktzone zwischen Matrix und Gesteinskörnung, die z. B. durch die Frostbeanspruchung induziert wurden, unmittelbar herabgesetzt. Ein Abfall des dynamischen E-Moduls beruht auf einer Verringerung der Ultraschallgeschwindigkeit im Probekörper infolge von Gefügeschädigungen (Mikrorissen). Solche Mikrorisse führen nicht zwangsläufig sofort zu einem Abfall des relativen dynamischen E-Moduls. Durch Feuchtigkeit in den Mikrorissen oder durch Kontakt der Rissufer können die Mikrorisse von Ultraschallwellen z. T. „überbrückt“ werden. Dadurch wird die Ultraschallgeschwindigkeit und damit der dynamische E-Modul nicht in dem Maße verringert, wie die Zugfestigkeit. Bei fortschreitender innerer Schädigung verlieren diese „Überbrückungen“ u. a. aufgrund von Rissaufweitungen an Bedeutung (siehe Abschnitt 5.4.2), so dass, wie im Bild 5-9 rechts zu sehen ist, die Differenz zwischen der relativen Spaltzugfestigkeit und dem relativen dynamischen E-Modul kleiner wird. Zur Zeit fehlen Erkenntnisse, inwiefern die an den Laborprobekörpern gewonnenen Zusammenhänge auch auf die Baupraxis übertragen werden können.

In Abschnitt 5.3.2 wurde beschrieben, dass an den Balken zumeist an den Enden ein lokales Rissnetz mit zum Teil großen Einzelrissen auftrat, wenn der relative dynamische E-Modul abfiel. Diese geschädigten Bereiche waren maßgebend für die Biegezugfestigkeit, da es innerhalb dieses Bereichs zwischen Widerlager und Lasteinleitungspunkt beim Biegezugversuch zum Versagen kam. Diese Ergebnisse mussten verworfen werden.

5.4.2 Dünnschliffe

Für die silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ (mS35, mS35/15) wurde die als Änderung des relativen dynamischen E-Moduls gemessene innere Gefügeschädigung mit Hilfe von Dünnschliffen visualisiert. In den Bildern B-4 bis B-9 ist das Gefüge der hochfesten Betone in Abhängigkeit von der Änderung des relativen dynamischen E-Moduls jeweils im Durchlicht und im Fluoreszenzlicht dargestellt. Bei einem Vergleich der beiden Betrachtungsarten kann gut zwischen Mikrorissen und poröseren Bereichen, wie z. B. der Kontaktzone, unterschieden werden. Die Ausschnitte der Bilder stammen jeweils aus einem vergleichbaren Bereich der CIF-Probekörper. In Bild 5-10 sind zur besseren Veranschaulichung in der oberen Reihe entsprechende Bildausschnitte bei einem relativen dynamischen E-Modul von ca. 80 % und in der unteren Reihe bei einem relativen dynamischen E-Modul von ca. 60 % im Fluoreszenzlicht zusammengestellt.

Die Schädigung des Gefüges ging immer von der Prüfoberfläche aus. Etliche Risse traten unabhängig vom Silikastaubgehalt bei einem dynamischen Elastizitätsmodul von ca. 80 % seines Ausgangswertes auf (Bild 5-10 obere Reihe). Es ist gut zu erkennen, dass die Risse um die Gesteinskörner und durch die Matrix zum nächsten Korn verliefen, wie es u. a. auch Kukko beschrieb [Kuk 92]. Des Weiteren deuteten die im Vergleich zur unbefrostenen Probe starken porösen Bereiche zwischen Matrix und Gesteinskorn auf eine Schwächung der Kontaktzone hin. Heine und Setzer halten eine Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls auf 80 % seines ursprünglichen Ausgangswertes für den Beginn einer deutlichen Schädigung des Gefüges [Hei 03]. Die mit Hilfe der Bilder dargestellten Gefügeveränderungen deuteten dies ebenfalls an.

Waren die Probekörper einer weiteren Frostbeanspruchung ausgesetzt, schritt die Gefügeschädigung ins Betoninnere vor. Im Vergleich zu den Rissen, die bei einem relativen dynamischen E-Modul von ca. 80 % beobachtet wurden, waren sie bei einem Abfall des relativen dynamischen E-Moduls auf ca. 60 % aufgeweitet (Bild 5-10 untere Reihe). Zu diesem Zeitpunkt der Schädigung waren das Gefüge und die Kontaktzone deutlich geschwächt. Die fortschreitende Schädigung des Gefüges war im Durchlichtmodus gut zu erkennen (siehe Bilder B-4 bis B-9).

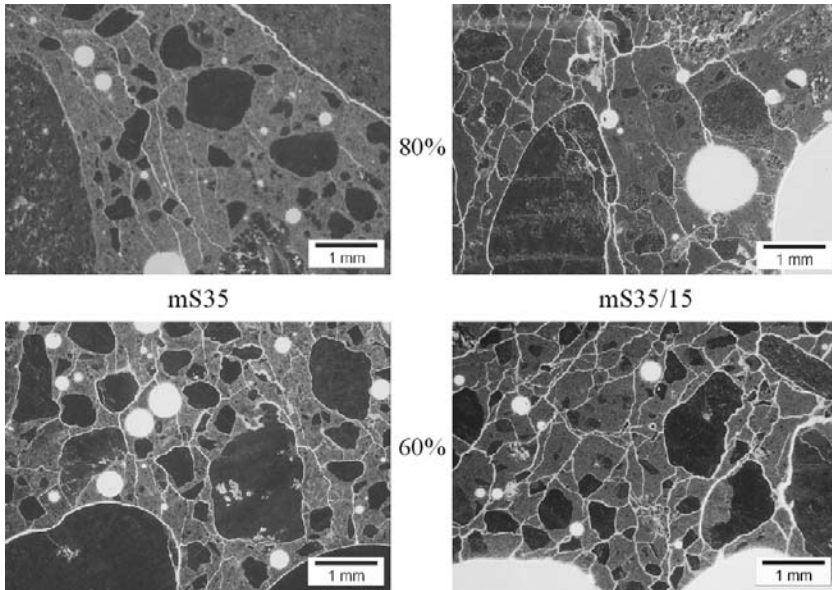


Bild 5-10: Dünnschliffe aus dem Betongefüge im Fluoreszenzlicht oben: rel. dyn. E-Modul von ca. 80 %, unten: von ca. 60 %

5.4.3 Dreidimensionale Computertomographie

Die Schädigung infolge des Frostangriffs wurde neben den zuvor beschriebenen Dünnschliffuntersuchungen beispielhaft auch mit Hilfe der in Abschnitt 4.3.5.4 beschriebenen dreidimensionalen Computertomographie an dem silikastaubhaltigen Beton mit einem $(w/z)_{eq} = 0,35$ (mS35) visualisiert. An einem aus einer CIF-Platte entnommenen Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm erfolgte die Frostprüfung mit dem CIF-Verfahren. Von der Prüffläche aus gesehen wurden die ersten rd. 24 mm des Bohrkernquerschnitts nach 0, 14, 28 und 42 Frost-Tau-Wechseln untersucht. Bild 5-11 zeigt den mittig platzierten, vertikalen Schnitt durch den Bohrkern vor Beginn der Frost-Tau-Wechsel (oben) und nach 42 Frost-Tau-Wechseln (unten). Zu diesem Zeitpunkt betrug der relative dynamische E-Modul des Bohrkerns ca. 80 % seines Ausgangswertes. In beiden Darstellungen ist annähernd derselbe Bereich im Bohrkern zu erkennen. Der weiß markierte Ausschnitt ist jeweils rechts neben dem Foto vergrößert dargestellt.

In der unteren Darstellung nach 42 Frost-Tau-Wechseln sind im Vergleich zu der oberen Darstellung unmittelbar vor der Frostbelastung feine helle Linien

insbesondere um die Gesteinskörner herum zu erkennen. Diese Linien sind Mikrorisse und belegen die Schwächung der Matrix und der Kontaktzone zwischen Mörtelmatrix und Gesteinskörnung. Die Untersuchungen mit der dreidimensionalen Computertomographie bestätigten die in Abschnitt 5.4.2 getroffenen Aussagen zur Schädigung des Gefüges.

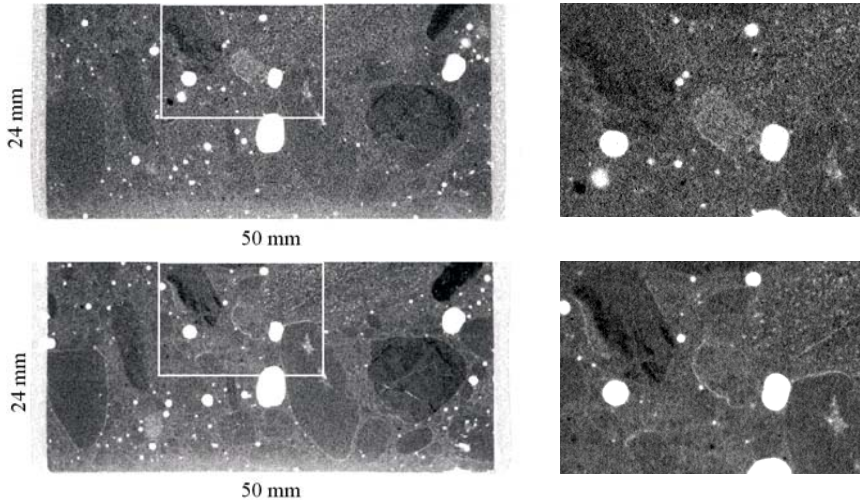


Bild 5-11: 3D-CT Aufnahme des Bohrkerns des silikastaubhaltigen Betons mS35: oben vor der Frostbelastung; unten nach 42 Frost-Tau-Wechseln (rel. dyn. E-Modul ca. 80 %)

5.4.4 Porosität

Die Porosität und die Porengrößenverteilung der Mörtelmatrix der hochfesten Betone wurden mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt. Eine Schädigung des Gefüges infolge einer Frostbeanspruchung wurde durch eine Veränderung der Porosität und der Porengrößenverteilung gegenüber einer ungeschädigten Probe erfasst. Die Untersuchungen erfolgten an Mörteln aus der Mitte der Platten, die mit dem CIF-Verfahren untersucht wurden. In den Bildern B-10 bis B-13 ist die Porengrößenverteilung der Mörtel nach der Vorlagerung im Alter von 28 Tagen der nach 56 Frost-Tau-Wechseln gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie wurden für die Porenanteile des Gelporen- ($0,004\ \mu\text{m}$ bis $0,01\ \mu\text{m}$) und des Kapillarporenbereichs ($0,03\ \mu\text{m}$ bis $10\ \mu\text{m}$) für die verschiedenen hochfesten Betone ausgewertet und in Bild 5-12 bzw. Bild 5-13 dargestellt. Mit Ausnahme des silikastaubhaltigen Betons

mit $(w/z)_{eq} = 0,30$ (mS30) war der Anteil an Gelporen nach 56 Frost-Tau-Wechseln im Vergleich zur Messung nach 28 Tagen leicht erhöht (Bild 5-12).

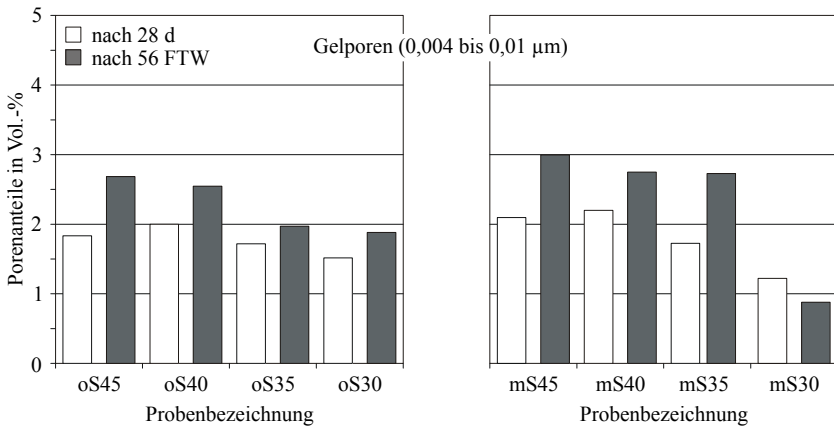


Bild 5-12: Gelporosität der Mörtelmatrix nach 28 Tagen bzw. nach 56 Frost-Tau-Wechseln

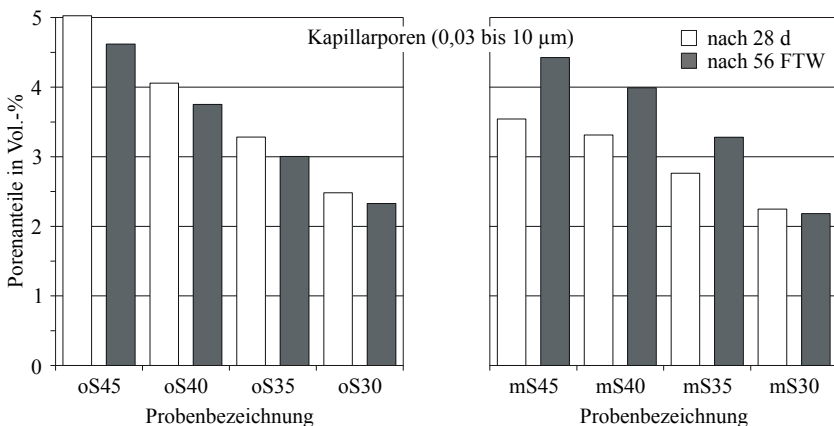


Bild 5-13: Kapillarporsität der Mörtelmatrix nach 28 Tagen bzw. nach 56 Frost-Tau-Wechseln

Aus Bild 5-13 geht hervor, dass sich nur bei den silikastaubhaltigen Betonen mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ (mS45, mS40 und mS35) der Anteil der als Kapillarporen bestimmten Porenräume nach 56 Frost-Tau-Wechseln gegenüber den Werten der Mörtel nach 28-tägiger Lagerung durch die Frostbeanspruchung deutlich vergrößerte. Dies waren die Betone, die innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel eine deutliche Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls zeigten (siehe Abschnitt 5.3.1).

Die prozentuale Änderung der Kapillarporosität nach 56 Frost-Tau-Wechseln bezogen auf den Ausgangswert nach 28tägiger Lagerung stellt ein Maß der Gefügeveränderung dar. Ist der Wert kleiner Null, wurde das Gefüge infolge fortschreitender Hydratation verdichtet und es fand keine nennenswerte Gefügeschädigung statt. Bei einer deutlichen Zunahme der Porosität hingegen ist das Gefüge durch den Frostangriff geschädigt worden. Bild 5-14 zeigt, dass der relative dynamische E-Modul mit der Porositätsänderung in der Matrix der hochfesten Betone korrelierte.

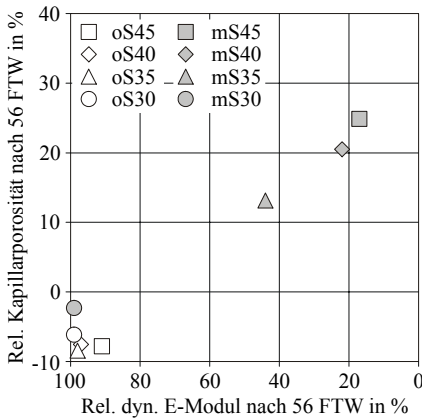


Bild 5-14: Zusammenhang zwischen Änderung der Kapillarporosität und relativem dynamischen E-Modul jeweils nach 56 Frost-Tau-Wechseln

5.4.5 Zusammenfassung

Die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls charakterisierte gut die Schädigung des Gefüges der hochfesten Betone infolge eines Frostangriffs. Dabei stellte eine Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls auf ca. 80 % seines Ausgangswertes den Beginn einer deutlichen inneren Gefügeschädigung dar. Bei einem Abfall auf nur noch 60 % war eine gravierende Schädigung des Gefüges der untersuchten hochfesten Betone eingetreten.

Der relative dynamische E-Modul als Maß der inneren Schädigung infolge eines Frostangriffs korrelierte mit anderen Festbetoneigenschaften wie Festigkeit oder Porosität. Mechanische Eigenschaften wie die Biegezug- bzw. Spaltzugfestigkeit reagierten jedoch sensibler auf eine Frostschädigung als die bei den beiden Frostlaborprüfverfahren als Kriterium verwendete Änderung des relativen dynamischen E-Moduls.

5.5 Einflüsse des Gefüges auf den Frostwiderstand

5.5.1 Festigkeitsparameter

Aus der Praxis ist bekannt, dass der Frostwiderstand eines Betons mit steigender Festigkeit zunimmt, wenn Gesteinskörnungen mit einem hohen Frostwiderstand zum Einsatz kommen und der Beton sachgerecht verarbeitet wird. Diesen Zusammenhang bestätigten Laboruntersuchungen, u. a. von Büsing et al. oder Siebel [Büs 05, Sie 92]. Siebel fand an normalfesten Betonen für die Prüfung des Frostwiderstands mit dem Würfelverfahren nach [Bun 91] folgenden Zusammenhang zwischen Festigkeit und Frostwiderstand. Betone mit einer 28 Tage-Druckfestigkeit von > 45 MPa (Würfel KL 100 mm) wiesen in jedem Fall einen Gewichtsverlust von < 5 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln und damit einen sehr hohen Frostwiderstand auf.

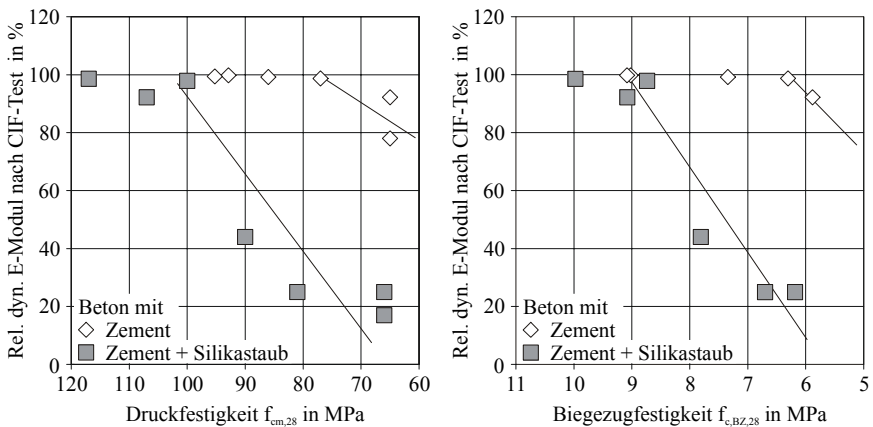


Bild 5-15: Zusammenhang zwischen relativem dynamischen E-Modul nach Beendigung des Frostversuchs und der nach 28 Tagen bestimmten Würfeldruckfestigkeit (links) Biegezugfestigkeit (rechts)

Bei hochfesten Betonen stellt, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, nicht die Abwitterung sondern die innere Gefügeschädigung die maßgebende Größe für die Beurteilung des Frostwiderstands dar. Somit muss die Messgröße, mit der die Gefügeschädigung infolge der Frostbeanspruchung bestimmt wurde, in Beziehung zur Festigkeit gestellt werden. In der vorliegenden Arbeit war der relative dynamische E-Modul diese Messgröße. In Bild 5-15 sind die Druckfestigkeit ($f_{cm,28}$) und die Biegezugfestigkeit ($f_{c,BZ,28}$) 28 Tage nach der Herstellung den Ergebnissen mit dem CIF-Verfahren aus Abschnitt 5.3.1 gegenübergestellt. Für beide Betonarten – ohne und mit Silikastaub – wurde festgestellt, dass in gewissen Bereichen eine Korrelation zwischen der Festigkeit und dem relativen dynamischen E-Modul bestand.

Jedoch zeigt Bild 5-15 anschaulich, dass in keinem Fall auf Grund einer nach 28 Tagen erreichten Festigkeit auf eine mögliche innere Gefügeschädigung infolge der Frostbeanspruchung im Labor und damit auf den Frostwiderstand von hochfesten Betonen geschlossen werden konnte. Für die untersuchten hochfesten Betone bestand kein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen der mit dem Laborprüfverfahren (CIF-Verfahren) bestimmten Änderung des relativen dynamischen E-Moduls nach der Frostbeanspruchung und der Druckfestigkeit bzw. Biegezugfestigkeit, wie ihn z. B. Siebel [Sie 92] fand.

5.5.2 Porosität

5.5.2.1 Luftporenkennwerte

Mit Hilfe der mikroskopischen Luftporenbestimmung nach E DIN EN 480-11: 1999-02 wurden die für den Frostwiderstand wichtigen Kennwerte Luftporengehalt und Mikroluftporengehalt A_{300} (Porenradius $\leq 300 \mu\text{m}$) sowie der Abstandsfaktor L bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tafel 5-1 enthalten und in Bild 5-16 bzw. Bild 5-18 dargestellt.

Tafel 5-1: Luftporenkennwerte der hochfesten Betone nach E DIN EN 480-11: 1999-02

Bezeichnung	(w/z) _{eq}	Luftporengehalt	Mikroluftporengehalt A_{300}	Abstandsfaktor L
		in Vol.-%		mm
oS45	0,45	1,53	0,63	0,10
mS45		2,18	0,50	0,18
oS40	0,40	2,88	1,11	0,09
mS40		2,44	1,13	0,08
oS35	0,35	3,63	0,87	0,13
mS35		2,82	1,05	0,08
oS30	0,30	3,03	0,68	0,09
mS30		2,85	0,99	0,10

Da die untersuchten hochfesten Betone ohne Luftporenbildner hergestellt wurden, überstieg der Mikroluftporengehalt der Betone einen A_{300} -Wert von 1,8 Vol.-% nicht. Dennoch war der Mikroluftporengehalt der Betone mit einem $(w/z)_{eq} < 0,45$ hoch. Auffällig war, dass im Gefüge der Betone mit Silikastaub tendenziell mehr Mikroluftporen enthalten waren, als in dem der vergleichbaren Betone ohne Silikastaub (Bild 5-16). Der Mikroluftporengehalt der Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,45$ (ohne und mit Silikastaub) lag mit Werten von 0,50 Vol.-% bis

0,63 Vol.-% in der Größenordnung von üblichen normalfesten Betonen ohne künstlich eingeführtes Luftporensystem. Vergleich man die Mikroluftporengehalte der einzelnen hochfesten Betone, so lag z. B. der des silikastaubhaltigen Betons mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ zwischen dem des silikastaubhaltigen Betons mit $(w/z)_{eq} = 0,30$ und dem des Betons ohne Silikastaub mit $(w/z)_{eq} = 0,40$. Dennoch fiel nur bei dem erstgenannten Beton der relative dynamische E-Modul bei der Prüfung im CIF-Test deutlich ab. Zwischen dem Gehalt an Mikroluftporen und dem Frostwiderstand der hochfesten Betone konnte kein allgemeingültiger Zusammenhang abgeleitet werden, wie auch noch einmal Bild 5-17 verdeutlicht. Es zeigt, dass der Mikroluftporengehalt keinen Einfluss auf die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls der hochfesten hatte.

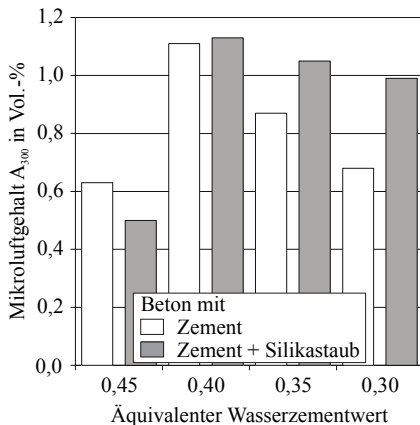


Bild 5-16: Mikroluftporengehalt A_{300} der Betone im Alter von 28 Tagen

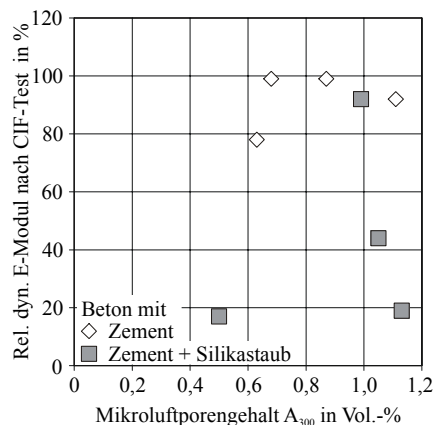


Bild 5-17: Rel. dyn. E-Modul nach Beendigung des CIF-Tests in Abhängigkeit des Mikroluftporengehalts A_{300} nach 28 Tagen

Der Abstandsfaktor aller hochfesten Betone war sehr gering und lag in der Größenordnung von üblichen Betonen mit einem künstlich eingeführten Luftporensystem. Ein Abstandsfaktor von 0,20 mm gilt als obere Grenze, bis zu der ein Beton in Verbindung mit einem ausreichenden Mikroluftporensystem ($A_{300} \geq 1,8$ Vol.-%) einen hohen Frostwiderstand aufweist. In Bild 5-18 ist zu erkennen, dass der Abstandsfaktor bei allen hochfesten Betonen mit Werten zwischen 0,08 mm und 0,18 mm unterhalb dieser Grenze lag. Mit dem Abstandsfaktor ließen sich ebenfalls keine systematischen Unterschiede zwischen den hochfesten Betonen ohne und mit Silikastaub erkennen, mit deren Hilfe das beobachtete Materialverhalten bei einer Frostbeanspruchung erklärbar gewesen wäre.

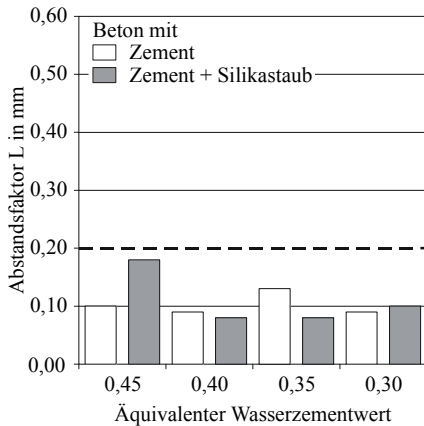


Bild 5-18: Abstandsfaktor L der Betone im Alter von 28 Tagen

5.5.2.2 Gesamtporosität

Die Gesamtporosität ($w_{15\text{MPa}}$) von Beton bzw. Mörtel stellt den offenen Porenraum dar, der bei einem Frostangriff als Ausweichporenraum zur Verfügung steht. Zu Beginn der Herstellung der Betone bzw. Mörtel entspricht die Gesamtporosität dem Volumen des Zugabewassers und ist als Ausgangsporosität definiert. Sie verringert sich durch die Reaktionsprodukte der Zementhydratation und ggf. der erst später einsetzenden puzzolanischen Reaktion des Silikastaubs.

Da für alle untersuchten silikastaubhaltigen Beton- bzw. Mörtelzusammensetzungen für die Berechnung des Wassergehalts der äquivalente Wasserzementwert nach Abschnitt 4.1.5 zu Grunde lag, war das Volumen des Zugabewassers für die Zusammensetzungen ohne und mit Silikastaub (siehe Tafel 4-1) und somit auch die Ausgangsporosität gleich. Für die einzelnen Betonzusammensetzungen ist die Ausgangsporosität in Tafel 5-2 zusammengestellt.

Im erhärteten Zustand wurde sowohl an den hochfesten Betonproben als auch an den separat hergestellten Mörtelproben die Gesamtporosität ($w_{15\text{MPa}}$) im Alter von 28 Tagen mit Hilfe der Wasseraufnahme bei 15 MPa nach Abschnitt 4.3.4.4 bestimmt. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tafel 5-2 enthalten.

Tafel 5-2: Gesamtporosität der Betone bei der Herstellung und nach 28 Tagen

Bezeichnung	(w/z) _{eq}	Beton			Mörtel
		Ausgangs- porosität In Vol.-%	Gesamtporosität W _{15MPa} Mörtelporosität*)		Gesamtporosität W _{15MPa}
			nach 28 d in Vol.-%		
oS45	0,45	22,5	17,4	28,8	28,8
mS45			18,7	30,7	30,8
oS40	0,40	20,0	15,8	27,1	-
mS40			16,8	28,4	-
oS35	0,35	17,5	14,5	25,2	25,0
mS35			15,3	26,5	26,2
mS32	0,32	16,0	14,4	25,7	25,4
oS30	0,30	15,0	12,7	22,7	-
mS30			13,8	24,6	-
oS25	0,25	12,5	11,0	19,4	18,8
mS25			11,7	21,7	19,7

^{*)} Gesamtporosität (W_{15MPa}) des Betons auf den enthaltenen Mörtel (Gesteinskörner bis 2 mm) umgerechnet

In Bild 5-19 ist die zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität der untersuchten hochfesten Betone dargestellt. Auf Grund der bei der voranschreitenden Hydratation entstehenden Reaktionsprodukte nahm die Gesamtporosität aller Betonzusammensetzungen während der 28tägigen Lagerung erwartungsgemäß ab. Die silikastaubhaltigen Betone wiesen im Alter von 28 Tagen eine um ungefähr 7 % bis 9 % höhere Gesamtporosität auf als die entsprechenden Betonzusammensetzungen ohne Silikastaub. Für die puzzolanische Reaktion zwischen Silikastaub und Calciumhydroxid nach Gleichung 3-1 wird in das Reaktionsprodukt, die CSH-Phasen, kein zusätzliches Wasser eingebunden. Das Anmachwasser stand somit nur für die Zementhydratation zur Verfügung. Als Konsequenz erhöhte sich der Wasserzementwert. Da die Gesamtporosität durch den Wasserzementwert (Abschnitt 3.2.2.1), nicht aber durch den Einsatz von Silikastaub [Sel 86] beeinflusst wird, ist die um 7 bis 9 % höhere Gesamtporosität der silikastaubhaltigen Betone erklärbar.

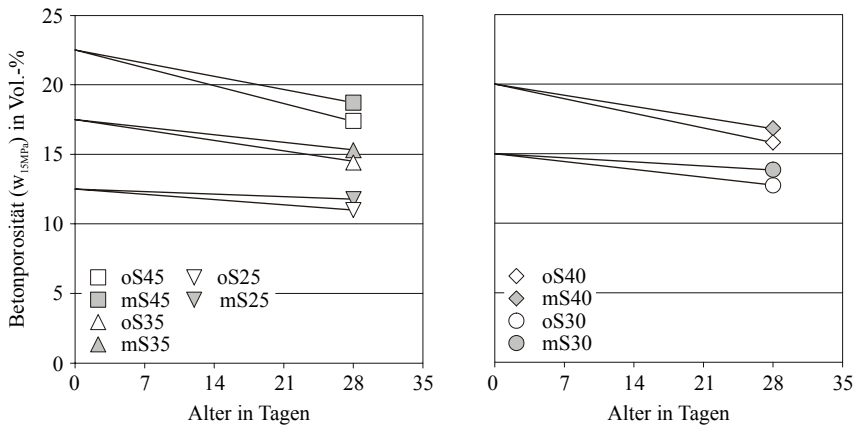


Bild 5-19: Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität (Poren > 0,0025 µm) der Betone

Der Zusammenhang zwischen der Gesamtporosität und dem äquivalenten Wasserzementwert ist in Bild 5-20 dargestellt. Erwartungsgemäß nahm die Gesamtporosität mit fallendem äquivalenten Wasserzementwert ab. Für die Betone ohne und mit Silikastaub stellte sich jeweils ein linearer Zusammenhang zwischen der Gesamtporosität und dem äquivalenten Wasserzementwert ein. Zusätzlich wurde die Gesamtporosität der silikastaubhaltigen Betone in Bild 5-20 über den Wasserzementwert (weiße Symbole) aufgetragen. Die Ergebnisse belegten die oben getroffene Aussage, dass die Gesamtporosität der hochfesten Betone nach 28 Tagen direkt vom Wasserzementwert abhängt.

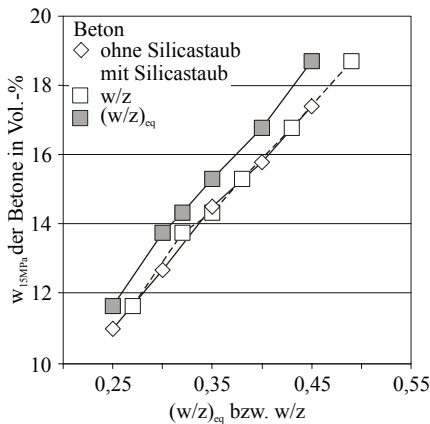


Bild 5-20: w_{15MPa} im Alter von 28 d in Abhängigkeit des $(w/z)_{eq}$ bzw. des w/z der Betone

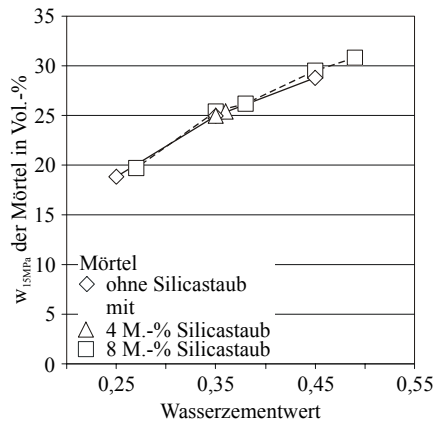


Bild 5-21: w_{15MPa} im Alter von 28 d in Abhängigkeit des w/z und des Silikastaubgehaltes der Mörtel

Der Zusammenhang zwischen Gesamtporosität und Wassorzementwert wurde mit zusätzlichen Versuchen an Mörteln bestätigt. Die Zusammensetzung der Mörtel entsprach der Matrix der hochfesten Betone (siehe Abschnitt 4.2.2). Tafel 5-2 enthält die Ergebnisse zur Gesamtporosität der Mörtel. In Bild 5-21 ist die Gesamtporosität der im Alter von 28 Tagen untersuchten Mörtel ohne sowie mit 4 bzw. 8 M.-% Silikastaub in Abhängigkeit vom Wassorzementwert dargestellt.

Da anzunehmen war, dass die Kontaktzone zwischen der Mörtelmatrix und der groben Gesteinskörnung ($> 2 \text{ mm}$) die Gesamtporosität und damit den maximal bei einem Frostangriff zur Verfügung stehenden Ausweichraum beeinflusst, wurden die an den separat hergestellten Mörteln bestimmten Porositäten den auf den Mörtelanteil umgerechneten Gesamtporositäten der hochfesten Betone gegenübergestellt (Bild 5-22).

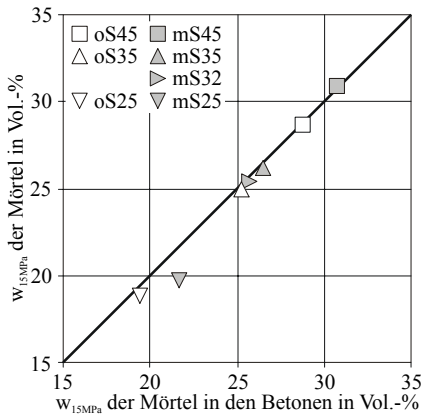


Bild 5-22: Gesamtporosität der separat hergestellten Mörtel in Abhängigkeit von der Gesamtporosität der Mörtel der Betone im Alter von 28 Tagen

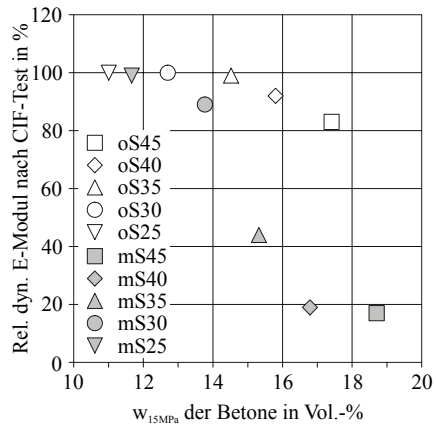


Bild 5-23: Rel. dyn. E-Modul nach Beendigung des CIF-Tests in Abhängigkeit von der Gesamtporosität der Betone im Alter von 28 Tagen

Wie aus Bild 5-22 hervorgeht, entsprach die Gesamtporosität der Mörtel annähernd der auf den Mörtelanteil bezogenen Gesamtporosität der vergleichbaren hochfesten Betone. Demnach hatte die Kontaktzone zwischen Mörtelmatrix und grober Gesteinskörnung ($> 2 \text{ mm}$) keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamtporosität. Auch bei den Betonen ohne Silikastaub bildete sich eine sehr dichte, die Gesamtporosität der Betone nicht beeinflussende Kontaktzone aus.

Eine geringe Porosität wirkt sich im allgemeinen positiv auf den Frostwiderstand von Beton aus. Da die Porosität vom Wasserzementwert beeinflusst wird, ist in DIN EN 206-1: 2001-07 / DIN 1045-2: 2001-07 eine Beschränkung des Wasserzementwertes bei einem Frostangriff gefordert. Alle Betone wurden mit Wasserzementwerten hergestellt, die kleiner sind als der in der Norm für die Expositionsklasse XF3 maximal erlaubte Wasserzementwert von 0,50 für Beton ohne künstlich eingeführtes Luftporensystem. In Bild 5-23 ist die Gesamtporosität der Betone im Alter von 28 Tagen in Beziehung zu der in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Änderung des relativen dynamischen E-Moduls nach 100 Frost-Tau-Wechseln mit dem CIF-Verfahren gesetzt. Generell wurde für die Betone ohne und mit Silikastaub jeweils die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls und damit die Gefügeschädigung nach dem Frostangriff kleiner, wenn die Porosität der Betone abnahm. Aber die Betonporosität der silikastaubhaltigen Betone musste deutlich kleiner sein als die der Betone ohne Silikastaub, um einen vergleichbaren Abfall des relativen dynamischen E-Moduls nach 100 Frost-Tau-Wechseln aufzuweisen. Ein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen der Gesamtporosität der Betone nach 28 Tagen und dem relativen dynamischen E-Modul existierte bei den untersuchten hochfesten Betonen nicht.

5.5.2.3 Poreneingangsradiusverteilung

Zur Beurteilung eines Betongefüges ist neben der Gesamtporosität vor allem die Porengrößenverteilung von Interesse. Prinzipiell kann der Feuchtigkeitstransport über alle Porenbereiche erfolgen, jedoch finden die maßgeblichen Feuchtigkeitstransporte insbesondere im Kapillarporensystem ($0,03\ \mu\text{m}$ – $10\ \mu\text{m}$) statt. Die Transportvorgänge laufen verstärkt ab, wenn grobe Kapillarporen ($> 0,03\ \mu\text{m}$) untereinander in Verbindung (Kontinuität) stehen [Pow 45]. Eine Differenzierung der verschiedenen Porenanteile ist zur genauen Charakterisierung des Gefüges auch deshalb notwendig, da sich mit kleiner werdenden Porenradien der Einfluss der Porenwandungen auf die Wassermoleküle erhöht. Dadurch wird, wie in Abschnitt 3.2.2.2 beschrieben, das chemische Potential des Porenwassers herabgesetzt und der Gefrierpunkt abgesenkt [Bru 77, Mei 79, Set 97, Sto 79]. Aus diesem Grund kann bei Temperaturen bis $-20\ ^\circ\text{C}$, wie sie maximal in den Laborversuchen zum Frostwiderstand, aber auch in der Praxis in unseren Breitengraden auftreten, lediglich das Kapillarporenwasser gefrieren. Wasser in den Gelporen ($< 0,01\ \mu\text{m}$) bleibt dagegen flüssig.

Mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie wurde im Alter von 28 Tagen die Porosität der Mörtelmatrix der hochfesten Betone in Abhängigkeit von der Porengröße im Bereich zwischen $0,004\ \mu\text{m}$ und $10\ \mu\text{m}$ bestimmt. Die

Ergebnisse aus der Mitte der CIF-Platten enthält Tafel 5-3. Die Balkendiagramme in Bild 5-24 zeigen die Hg-Porosität sowie den Gel- und Kapillarporenanteil der Mörtelmatrix der untersuchten Betone.

Bild 5-24 links zeigt, dass bei der Untersuchung 28 Tage nach der Herstellung erwartungsgemäß die Hg-Porosität der Mörtelmatrix mit sinkendem äquivalenten Wasserzementwert infolge des dichteren Gefüges von rd. 10,5 Vol.-% (oS45) auf ca. 5,2 Vol.-% (mS30) abnahm. Die Größenordnung der Hg-Porosität der untersuchten hochfesten Betone deckte sich mit Literaturangaben von z. B. [Hua 85, Rüb 94]. Im Gegensatz zur Gesamtporosität (Abschnitt 5.5.2.2) war die Hg-Porosität der silikastaubhaltigen Betone im Vergleich zu den entsprechenden Betonen ohne Silikastaub um rd. 18 % geringer. Die Ergebnisse stehen nicht im Widerspruch, da bei der Bestimmung der Gesamtporosität alle Poren bis zu einem Radius von $0,0002\ \mu\text{m}$ einschließlich der Luftporen (siehe Abschnitt 5.5.2.1) erfasst wurden. Aus den Unterschieden, die sich bei der Bestimmung der Gesamtporosität und der Hg-Porosität zwischen den Betonen ohne und mit Silikastaub ergaben, folgt, dass insbesondere die Mörtelmatrix der hochfesten Betone mit Silikastaub einen höheren Anteil sehr feiner Poren im Bereich zwischen $0,0002$ und $0,004\ \mu\text{m}$ aufwies. Durch den Silikastaubeinsatz fand eine Verschiebung der Porenradien zu sehr feinen Poren statt.

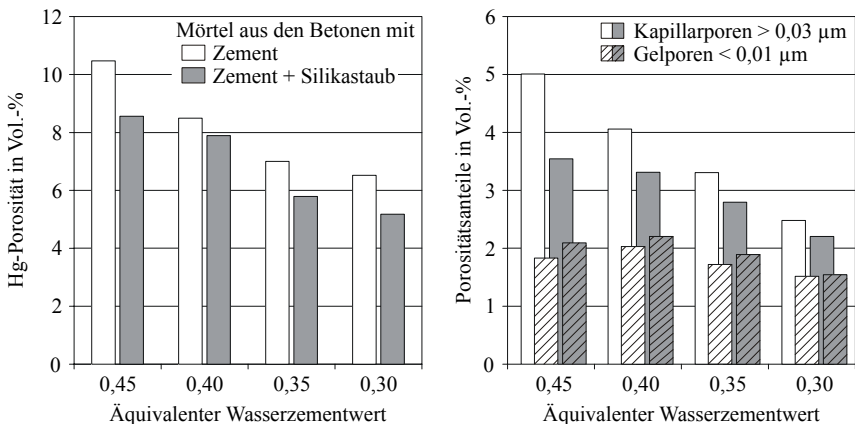


Bild 5-24: Porosität und Porositätsanteile der Mörtel aus der Mitte der Betone ohne und mit Silikastaub bestimmt aus den Summenkurven der Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie im Alter von 28 Tagen

Die Auswertung der Hg-Porosität für die Gelporosität ($< 0,01\ \mu\text{m}$) und die Kapillarporosität ($> 0,03\ \mu\text{m}$) ergab für die Mörtel aus den hochfesten Betonen die in Bild 5-24 rechts dargestellten Verhältnisse. Mit fallendem äquivalenten

Wassorzementwert nahm die Kapillarporosität der Mörtelmatrix aller Betone von ca. 5 Vol.-% (oS45) auf rd. 2,2 Vol.-% (mS30) ab. Dabei verschoben sich die Porenradien, wie auch in der Literatur beschrieben [Alt 90, Gus 98, Rüb 94], i. d. R. zugunsten kleinerer Porenradien. Silikastaubhaltige Betone wiesen generell eine geringere Kapillarporosität auf als die vergleichbaren Betone ohne Silikastaub. Die durch die Silikastaubzugabe hervorgerufene Abnahme der Kapillarporosität fiel mit kleineren äquivalenten Wassorzementwerten geringer aus. Sie betrug bei $(w/z)_{eq} = 0,45$ ca. 30 %, bei $(w/z)_{eq} = 0,40$ bzw. 0,35 ca. 20 % und bei $(w/z)_{eq} = 0,30$ nur noch rd. 10 %. Im Gegensatz zu der deutlichen Reduktion des Kapillarporenanteils, als Folge der Abnahme des äquivalenten Wassorzementwertes einerseits und des Einsatzes von Silikastaub andererseits, blieb die Gelporosität im Porenbereich zwischen 0,004 und 0,01 μm der Mörtel aus den Betonen mit Werten zwischen 1,5 Vol.-% und 2,2 Vol.-% annähernd unverändert.

Tafel 5-3: Kenngrößen der Quecksilberdruckporosimetrie für Mörtel aus dem Betonen im Alter von 28 Tagen

Bezeichnung	$(w/z)_{eq}$	Hg-Porosität	> 0,01 μm	> 0,03 μm	< 0,01 μm	Grenzradius
nach 28 d in Vol.-% / in % von w_{15MPa}						[μm]
oS45	0,45	10,5	8,7 / <u>30</u>	5,0 / <u>17</u>	1,8	0,047
mS45		8,6	6,5 / <u>21</u>	3,5 / <u>12</u>	2,1	0,018
oS40	0,40	8,5	6,5 / <u>24</u>	4,1 / <u>15</u>	2,0	0,039
mS40		7,9	5,7 / <u>20</u>	3,3 / <u>12</u>	2,2	0,015
oS35	0,35	7,0	5,3 / <u>21</u>	3,3 / <u>13</u>	1,7	0,019
mS35		5,8	3,9 / <u>15</u>	2,8 / <u>11</u>	1,9	0,011
oS30	0,30	6,5	5,0 / <u>22</u>	2,5 / <u>11</u>	1,5	0,032
mS30		5,2	3,7 / <u>15</u>	2,2 / <u>9</u>	1,5	0,007

Da sich, wie zuvor geschildert, bei allen hochfesten Betonen ein Großteil der Poren im Bereich zwischen 0,0002 und 0,004 μm befand, muss die Angabe der Gelporosität um diesen Anteil erweitert werden. Unter Berücksichtigung der in den Abschnitten 5.5.2.1 und 5.5.2.2 ermittelten Luftporengehalte bzw. Gesamtporositäten erhielt man die in Bild 5-25 dargestellte „gesamte“ Gelporosität. Für die Mörtel der Betone ohne Silikastaub lag sie zwischen 11,5 und 17,5 Vol.-% und für die Mörtel der silikastaubhaltigen Betone zwischen 16 und 21 Vol.-%. Die Gelporosität nahm jeweils für die beiden Betonarten mit steigendem äquivalenten Wassorzementwert annähernd linear zu. Die Zunahme war erwartungsgemäß, da durch höhere äquivalente Wassorzementwerte der Zugabewassergehalt in den Betonen ansteigt und bei sonst gleichen Lagerungs-

bedingungen mehr Zement hydratisieren und sich mehr CSH (Gel) bilden konnte.

Die um rd. 20 % höhere Gelporosität der Mörtel der silikastaubhaltigen Betone im Vergleich zu den Mörteln der Betone ohne Silikastaub war auf zwei Faktoren zurückzuführen. Zum Einen wirkte der Silikastaub als Kristallisationskeim und beschleunigte so die Hydratation des Zements. Zum Anderen reagierte der Silikastaub mit dem aus der Zementhydratation gebildeten Calciumhydroxid zu zusätzlichen CSH-Phasen (siehe Abschnitt 5.7), so dass insgesamt mehr CSH-Phasen in den silikastaubhaltigen Systemen gebildet wurden und die Gelporosität entsprechend anstieg.

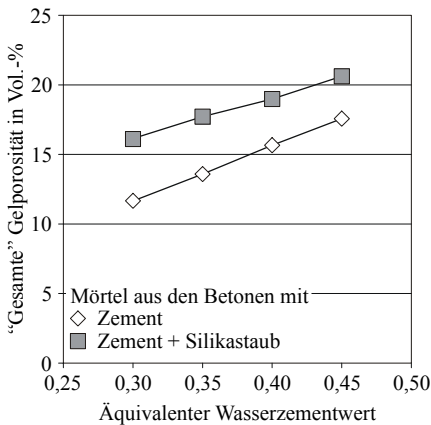


Bild 5-25: Gelporosität im Porenbereich 0,0002 – 0,01 μm der Mörtel der Betone ohne und mit Silikastaub im Alter von 28 Tagen

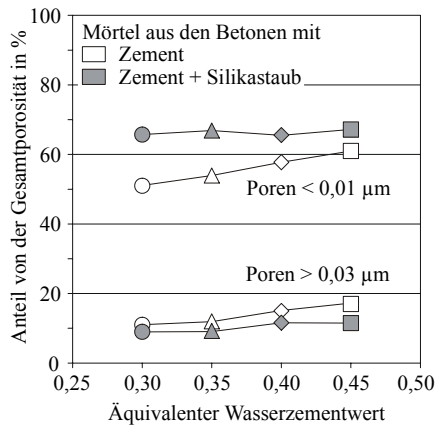


Bild 5-26: Prozentuale Porenanteile von der Gesamtporosität der Mörtel der Betone ohne und mit Silikastaub im Alter von 28 Tagen

Zur besseren Vergleichbarkeit der Porensysteme sind neben den Absolutwerten auch die Relationen der einzelnen Porenanteile zueinander von Interesse. Bild 5-26 zeigt die Porenanteile der Gelporosität ($< 0,01 \mu\text{m}$) und der Kapillarporosität ($> 0,03 \mu\text{m}$) bezogen auf die Gesamtporosität ($w_{15\text{MPa}}$). Der Anteil der Gelporosität betrug für die Mörtel der silikastaubhaltigen Betone unabhängig vom äquivalenten Wasserzementwert ca. 66 %. Im Gegensatz dazu nahm dieser Wert für die Mörtel der Betone ohne Silikastaub von rd. 61 % bei $(w/z)_{\text{eq}} = 0,45$ auf rd. 51 % bei $(w/z)_{\text{eq}} = 0,30$ annähernd linear ab. Zwischen vergleichbaren Mörteln aus den Betone ohne und mit Silikastaub differierten die Kapillarporenanteile nur geringfügig. Tendenziell nahm der Kapillarporenanteil mit fallendem äquivalenten Wasserzementwert ab.

Durch eine geringe Kapillarporosität wird die Menge an gefrierbarem Wasser begrenzt und die kapillare Sauggeschwindigkeit und damit die Sättigung des Porensystems verringert [Bit 85]. Deshalb sollte sich eine geringe Kapillarporosität prinzipiell positiv auf den Widerstand eines Betons gegenüber einem Frostangriff auswirken. Jedoch ließ sich mit der Kapillarporosität das beobachtete Materialverhalten bei einer Frostbeanspruchung nicht erklären. Wurden z. B. die silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ (mS45 bis mS35) mit dem Beton ohne Silikastaub mit $(w/z)_{eq} = 0,45$ (oS45) verglichen, so wiesen die silikastaubhaltigen Betone in jedem Fall eine geringere Kapillarporosität auf. Trotzdem fiel an diesen Betonen der relative dynamische E-Modul schon innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel infolge der Frostbeanspruchung deutlich ab, während bei dem Beton ohne Silikastaub selbst nach 100 Frost-Tau-Wechseln nur eine leichte Änderung zu erkennen war (siehe Bild 5-4).

Dieser Zusammenhang wurde deutlicher, wenn die Ergebnisse zum Frostwiderstand der hochfesten Betone in Beziehung zur Kapillarporosität gesetzt wurden (Bild 5-27).

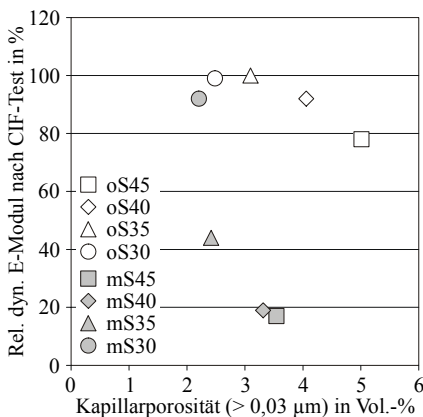


Bild 5-27: Rel. dyn. E-Modul nach Beendigung des CIF-Tests in Abhängigkeit von der Kapillarporosität der Betone im Alter von 28 Tagen

Allgemein galt jeweils für die Betone ohne und mit Silikastaub, dass mit abnehmender Kapillarporosität der relative dynamische E-Modul größer und damit die in Abschnitt 5.3.1 beschriebene Gefügeschädigung nach dem Frostangriff kleiner wurde. Aus Bild 5-27 geht hervor, dass der relative dynamische E-Modul bei silikastaubhaltigen Betonen mit einer Kapillarporosität von rd. 2,4 Vol.-% innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel stark abfiel. Dagegen war eine leichte Änderung des relativen dynamischen E-Moduls bei den hochfesten Betonen ohne Silikastaub mit einer Kapillarporosität von ca. 5 Vol.-% erst nach 100 Frost-Tau-Wechseln feststellbar. Ein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen der Kapillarporosität der Mörtelmatrix der Betone

nach 28 Tagen und der mit dem Laborverfahren bestimmten Gefügeschädigung existierte bei den untersuchten hochfesten Betonen nicht.

5.5.2.4 Einfluss des Silikastaubgehalts auf die Porosität

Der Austausch von Zement durch Silikastaub im Beton bzw. Mörtel beeinflusst auf Grund der Füllerwirkung, der Beschleunigung der Hydratation und der zusätzlichen Bildung von CSH-Phasen das Porensystem nachhaltig. Der Einfluss auf die Veränderung der Porenanteile wurde an separat hergestellten Mörteln mit einem $(w/z)_{eq} = 0,35$ untersucht. In Tafel A-12 sind die Ergebnisse der Wasseraufnahme bei 15 MPa und der Quecksilberdruckporosimetrie zusammengefasst.

Die Auswertung der Ergebnisse nach den Porenanteilen Gelporen ($< 0,01 \mu m$), grobe Kapillarporen ($> 0,03 \mu m$) sowie Übergangsbereich von Gel- zu feinen Kapillarporen ergab die in Bild 5-28 dargestellten Verhältnisse. Das linke Diagramm enthält die Absolutwerte der Porosität, das rechte die in Relation zur Gesamtporosität w_{15MPa} gesetzten Ergebnisse. Die Gesamtporosität der Mörtel war mit rd. 25 Vol.-% annähernd konstant. Lediglich beim Mörtel mit 15 M.-% Silikastaub bezogen auf die Zementmasse nahm die Gesamtporosität leicht ab. Der Kapillarporenanteil ($> 0,03 \mu m$) blieb mit einem Wert von rd. 3 Vol.-% bzw. mit einem Anteil von 14 % an der Gesamtporosität nahezu unbeeinflusst von der Silikastaubzugabe. Tendenziell erhöhte sich aus den zuvor beschriebenen Gründen die Gelporosität mit Zunahme des Silikastaubgehaltes leicht. Dagegen nahmen die Poren im Übergangsbereich mit steigendem Silikastaubgehalt kontinuierlich ab.

Auch mit einer Erhöhung des Silikastaubgehaltes von 8 auf 15 M.-% bezogen auf die Zementmasse fiel der relative dynamische E-Modul während des CIF-Tests deutlich ab, während er bei dem Beton ohne Silikastaub (oS35) auch nach 100 Frost-Tau-Wechseln annähernd unverändert blieb (siehe Abschnitt 5.3.1). Die weitere Verringerung der Gesamtporosität und insbesondere die des Übergangsbereichs von Gel- zu feinen Kapillarporen führte nicht zu einer deutlichen Verbesserung des Frostwiderstands der silikastaubhaltigen hochfesten Betone.

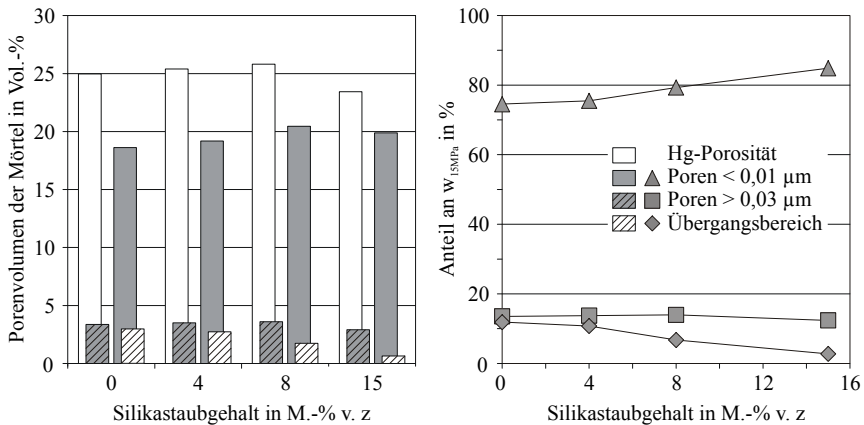


Bild 5-28: Hg-Porosität (links) und Anteile an der Gesamtporosität w_{15MPa} (rechts) der Mörtel in Abhängigkeit des Silikastaubgehaltes im Alter von 28 Tagen

5.5.2.5 Einfluss der Lagerung auf die Porosität des oberflächennahen Bereichs

Wasser kann während der Klimaraumlagerung infolge der geringen relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % im Klimaraum aus den Probekörpern verdunsten. Da, wie zuvor beschrieben, alle hochfesten Betone ein sehr dichtes, kapillarporenarmes Gefüge aufweisen, sollte die Verdunstung nur im oberflächennahen Bereich stattfinden (siehe Abschnitt 5.6.1.1). Der mit der Verdunstung verbundene Wasserentzug kann die Hydratation und somit die Ausbildung des Porensystems im Beton beeinflussen.

Mit zusätzlichen Porositätsbestimmungen mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie wurde an der oberflächennahen Mörtelmatrix der hochfesten Betone im Bereich zwischen 0 bis 10 mm dieser mögliche Einfluss untersucht. Die Ergebnisse enthält Tafel A-13. Die Bilder B-14 bis B-17 zeigen die kumulativen Porenvolumina in Abhängigkeit des Porenradius für die Betone ohne und mit 8 M.-% Silikastaub und $(w/z)_{eq}$ von 0,45 bis 0,30 für das Betoninnere und den oberflächennahen Bereich. In Bild 5-29 sind die Hg-Porosität und die Gelporosität im Bereich zwischen 0,004 µm und 0,01 µm der oberflächennahen Mörtelmatrix den Porositäten der Mörtelmatrix aus der Mitte der CIF-Platten gegenübergestellt.

Gut zu erkennen ist, dass bei allen Mörteln der Betone mit einem $(w/z)_{eq} < 0,45$ die 21-tägige Klimaraumlagerung keinen Einfluss auf die Hg-Porosität im oberflächennahen Bereich ausübte. Lediglich die oberflächennahe Mörtelmatrix

der beiden Betone ohne und mit Silikastaub und $(w/z)_{eq} = 0,45$ (oS45 und mS45) wies eine tendenziell höhere Hg-Porosität auf als die Mörtelmatrix in der Mitte der Betone. Jedoch beeinflusste die Klimaraumlagerung nicht die Hydratation im oberflächennahen Bereich, denn alle untersuchten oberflächennahen Mörtel besaßen eine den entsprechenden Mörteln aus der Mitte der CIF-Platten vergleichbare Gelporosität (Bild 5-29 links unten). Die Verdunstung erhöhte somit im oberflächennahen Bereich die Kapillarporosität ($> 0,03 \mu\text{m}$) sowie den Übergangsbereich von den Gelporen zu den kleinen Kapillarporen ($0,01 - 0,03 \mu\text{m}$) dieser Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,45$ (Tafel A-13).

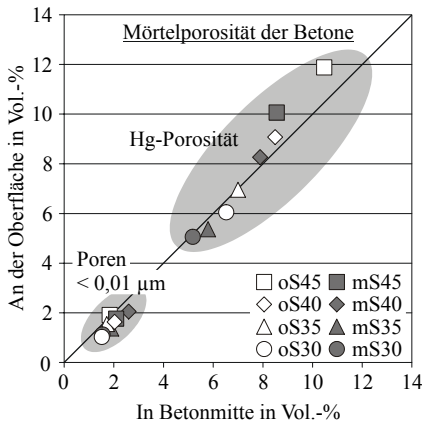


Bild 5-29: Zusammenhang zwischen der Porosität der Mörtel in der Mitte und an der Oberfläche der Betone im Alter von 28 Tagen bestimmt mit der Quecksilberdruckporosimetrie

5.5.2.6 Grenzradius

Eine weitere charakteristische Größe der Porenverteilung eines Betons ist der Grenzradius. Er beschreibt die Porengröße, ab der bei der Untersuchung mit der Quecksilberdruckporosimetrie erstmals größere Mengen Quecksilber in das Gefüge eindringen, also ab der das Porensystem vernetzt ist. Die von Romberg [Rom 78] beschriebene Abhängigkeit der Vernetzung des Porensystems vom Wasserzementwert kann mit Hilfe des Grenzradius dargestellt werden. Nach Wesche [Wes 93] ist bei einem Wasserzementwert $> 0,60$ ein Porensystem kontinuierlich vernetzt. Mit fallendem Wasserzementwert nimmt der Vernetzungsgrad ab.

Den Zusammenhang zwischen Grenzradius und äquivalentem Wasserzementwert zeigt Bild 5-30. Mit sinkendem äquivalenten Wasserzementwert verschoben sich die Grenzradien im Allgemeinen zu feineren Porenradien.

Auf Grund der geringen äquivalenten Wasserzementwerte, mit denen die untersuchten hochfesten Betone hergestellt wurden, wies das Porensystem eine geringe Kontinuität auf. Deshalb lagen die Grenzzradien der Poren für die Mörtel der hochfesten Betone ohne Silikastaub zwischen $0,047\text{ }\mu\text{m}$ und $0,032\text{ }\mu\text{m}$ an der unteren Grenze der Kapillarporosität. Die Abnahme der Grenzzradien infolge der Verringerung des äquivalenten Wasserzementwertes fiel deutlich geringer aus als z. B. bei Mörteln mit Wasserzementwerten zwischen $0,60$ und $0,40$, wie sie u. a. von [Wie 05] untersucht wurden.

Deutlich stärker wurde die Kontinuität des Kapillarporensystems der Mörtel durch die hohe Reaktivität des Silikastaubs beeinflusst. Schon nach 28 Tagen unterbrachen die neu gebildeten CSH-Phasen aus der puzzolanischen Reaktion des Silikastaubs den geringen Kapillarporenraum aus der Zementhydratation wirksam. Der Grenzzradius sank annähernd unabhängig vom äquivalenten Wasserzementwert auf Porenradien $< 0,03\text{ }\mu\text{m}$ in den Übergangsbereich von den Gelporen zu den feinen Kapillarporen. Die Reaktionsprodukte des Silikastaubs könnten sich an den Poreneingängen anlagern und den dahinterliegenden Porenraum verschließen („pore blocking effect“ [Mar 85]). Auf die Gesamtporosität hatte der Verschluss der Poren jedoch keinen Einfluss.

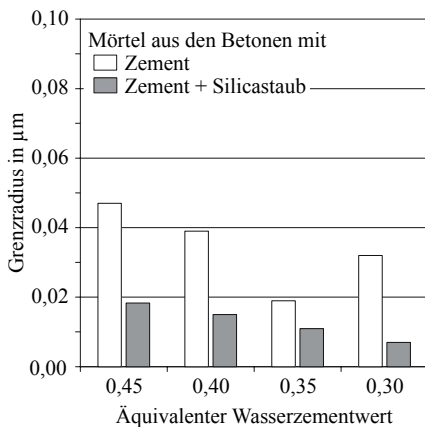


Bild 5-30: Grenzzradien der Mörtel aus der Mitte der Betone nach 28 Tagen

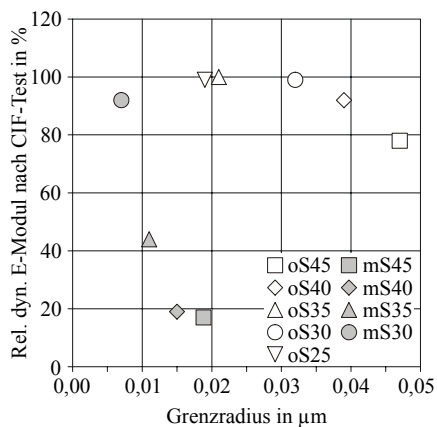


Bild 5-31: Rel. dyn. E-Modul nach Beendigung des CIF-Tests in Abhängigkeit des Grenzzradius der Mörtel aus den Betonen nach 28 Tagen

Durch die Verschiebung des Grenzzradius zu kleineren Porenradien wird der Transport von Feuchtigkeit und darin gelöster Stoffe behindert [u. a. Rom 78, Nya 85, Hal 95, Wie 00]. Dieser z. B. für die Chloridmigration günstige Mechanismus sollte auch für den Frostwiderstand hochfester Betone gelten.

Jedoch könnten bei einer zu geringen Vernetzung des Porensystems, d. h. bei einer zu hohen Absenkung des Grenzradius, für einen ausreichenden Frostwiderstand notwendige Ausweichräume nicht oder nur sehr eingeschränkt erreichbar werden. Als Folge daraus sollte sich ein optimaler Bereich des Grenzradius einstellen, bei dem ein hoher Frostwiderstand gegeben ist. Bei Grenzradien, die außerhalb des optimalen Bereichs liegen, d. h. die Vernetzung des Porensystems gut ausgebildet bzw. stark behindert ist, sollte eine Änderung des relativen dynamischen E-Moduls bei der Prüfung des Frostwiderstands festgestellt werden können.

Diesen Zusammenhang zwischen dem Frostwiderstand, dargestellt als Änderung des relativen dynamischen E-Moduls nach Beendigung des CIF-Verfahrens, und dem als Maß der Vernetzung zu interpretierenden Grenzradius der Mörtelmatrix der hochfesten Betone im Alter von 28 Tagen zeigt Bild 5-31. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass zwar für Beton ohne und mit Silikastaub mit steigendem Grenzradius, d. h. mit einer höheren Vernetzung des Porensystems, sich die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls und damit die Schädigung infolge des Frostangriffs vergrößerte. Die Größe des Grenzradius, bei dem ein Absinken des relativen dynamischen E-Moduls auftrat, war aber sehr unterschiedlich, je nachdem, ob der Beton Silikastaub enthielt oder nicht. Es stellte sich nicht, wie erwartet, ein „optimaler“ Bereich der Grenzradien ein. Daher ließen sich auch mit einer Grenzradienbetrachtung die bei der Frostbeanspruchung beobachteten Unterschiede zwischen den Betonen ohne und mit Silikastaub nicht erklären.

5.5.3 Mikrorissneigung

In verschiedenen Untersuchungen zur Prüfung der Leistungsfähigkeit von Betonen mit niedrigen äquivalenten Wasserzementwerten ohne und mit Silikastaub wurde eine Mikrorissbildung im Gefüge von Betonen beobachtet und als mögliche Ursache für bestimmte Betoneigenschaften vermutet [z. B. Gus 94, Wie 96]. In Bereichen, in denen ein gut vernetztes System von Mikrorissen vorhanden ist, besteht grundsätzlich die Möglichkeit des verstärkten Eindringens von Flüssigkeiten [Wie 98]. Eine während der Hydratation induzierte Mikrorissbildung kann somit prinzipiell den Widerstand gegenüber einem Frostangriff negativ beeinflussen. Dem möglichen Einfluss einer Mikrorissneigung wurde mit Versuchen zur kapillaren Wasseraufnahme und mit Untersuchungen an Dünnschliffen nachgegangen.

Im Anschluss an die in Abschnitt 4.2.1 beschriebene 28-tägige Lagerung wurde an den hochfesten Betonen die kapillare Wasseraufnahme im Rahmen des CIF-Verfahrens bestimmt. Die Betone nahmen innerhalb von sieben Tagen die in

Bild 5-32 dargestellten, auf die Probekörpermassen bezogenen Mengen an Wasser kapillar auf. Mit sinkendem äquivalenten Wasserzementwert nahm erwartungsgemäß die kapillare Wasseraufnahme infolge des dichteren Gefüges ab. Die kapillare Wasseraufnahme der Betone ohne Silikastaub verringerte sich zwischen den $(w/z)_{eq}$ von 0,45 und 0,40 um ca. 0,5 M.-% von rd. 1 M.-% auf ungefähr 0,5 M.-%. Die Abnahme fiel mit weiter sinkendem äquivalenten Wasserzementwerten deutlich geringer aus.

Die starke Abnahme der kapillaren Wasseraufnahme infolge des Austausches von Zement mit Silikastaub bei den höheren Wasserzementwerten bestätigte die Ergebnisse zur Kapillarporosität der Mörtel aus den Betonen (Abschnitt 5.5.2.3). An dem Beton mit dem $(w/z)_{eq} = 0,45$ wurde die Wasseraufnahme durch den Austausch von Zement durch Silikastaub deutlich gesenkt. Ab einem $(w/z)_{eq} \leq 0,40$ war keine signifikante Reduktion der kapillaren Wasseraufnahme gegenüber den Betonen ohne Silikastaub durch diese Maßnahme feststellbar. Die Ergebnisse zur kapillaren Wasseraufnahme ließen keinen Rückschluss auf eine etwaige frühe Mikrorissbildung durch chemisches Schwinden der silikastaubhaltigen hochfesten Betone als Ursache der Frostschädigung zu.

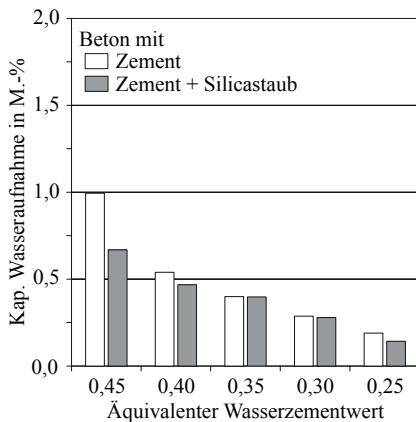


Bild 5-32: Kapillare Wasseraufnahme der Betone ohne und mit Silikastaub im Alter von 28 Tagen

Eine mögliche frühe Mikrorissbildung wurde mit Hilfe von Dünnschliffen an den Betonen mit 0, 8 und 15 M.-% Silikastaub bezogen auf die Zementmasse und einem $(w/z)_{eq} = 0,35$ (oS35, mS35 und mS35/15) visuell untersucht. Im Alter von 28 Tagen wurden den Betonen Probekörper rechtwinklig zur Prüfoberfläche entnommen und nach Abschnitt 4.3.4.2 präpariert. Bild 5-33 zeigt von links nach rechts Dünnschliffe der Betone oS35, mS35 und mS35/15. In der oberen Bildreihe ist das Gefüge im Fluoreszenzlicht dargestellt, während in der unteren Reihe jeweils derselbe Ausschnitt im Durchlicht zu sehen ist. Im Fluoreszenzlicht (obere Reihe in Bild 5-33) erscheinen Gesteinskörner schwarz

bis dunkelgrau (1), die Mörtelmatrix hellgrau (2), Mikrorisse als scharfe weiße Linien (3) und porösere Bereiche als unscharf verlaufende Säume z. B. um Gesteinskörner (4). Im Durchlicht (untere Reihe in Bild 5-33) sind die Gesteinskörner hell (1) und die Mörtelmatrix dunkel (2). Mikrorisse sind als feine weiße Linien zu erkennen (3). Luftporen werden in beiden Darstellungsmodi als weiße kreisförmige Bereiche (5) abgebildet. Bei einem Vergleich der Aufnahmen im Fluoreszenzlicht und im Durchlicht kann bei den Betonen gut zwischen einem Mikroriss und einem poröseren Bereich wie der Kontaktzone unterschieden werden.

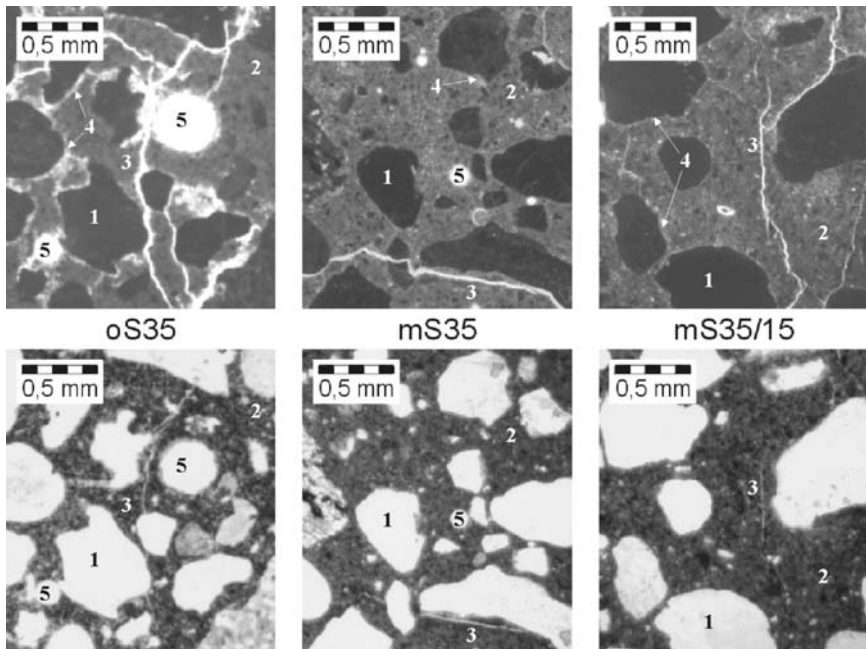


Bild 5-33: Dünnschliffe aus dem Betongefüge der Betone oS35, mS35 und mS35/15 im Alter von 28 Tagen oben: Fluoreszenzlicht, unten: Durchlicht; 1 Gesteinskörner; 2 Mörtelmatrix; 3 Mikrorisse; 4 poröse Bereiche; 5 Luftporen

Bild 5-33 macht die in Abschnitt 5.5.2 beschriebenen Ergebnisse zur Porosität anschaulich. Der Austausch von Zement mit Silikastaub führte zu einer Verfeinerung der Porosität. Insbesondere in der Kontaktzone zwischen Matrix und Gesteinskörnung verringerten sich die weißen Säume, so dass bei der gewählten Auflösung nur noch leichte Ansätze von poröseren Bereichen zu erkennen waren. Aus Anschauungsgründen wurde bei jedem Beispiel ein Ausschnitt mit einem Mikroriss ausgewählt, obwohl alle Betone unabhängig vom Silikastaubgehalt nur selten, vereinzelte Mikrorisse im Gefüge aufwiesen.

Eine frühe Mikrorissbildung bei den silikastaubhaltigen Betonen als Ursache für die starke Änderung des relativen dynamischen E-Moduls während des Frostversuchs konnte an Hand der Dünnschliffuntersuchungen an Betonen mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ nicht bestätigt werden.

5.5.4 Zusammenfassung

Die Gesamtporosität der Betone wurde als Wasseraufnahme bei 15 MPa im Alter von 28 Tagen bestimmt. Sie nahm erwartungsgemäß mit sinkendem äquivalenten Wasserzementwert ab. Die Betone mit Silikastaub wiesen bei gleichem äquivalenten Wasserzementwert eine um 7 bis 9 % höhere Gesamtporosität auf. Wurde der Anteil an Silikastaub nicht bei der Berechnung des Wasserzementwertes berücksichtigt, ergab sich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Gesamtporosität und dem Wasserzementwert.

Im Alter von 28 Tagen nahm die Hg-Porosität der Mörtelmatrix der hochfesten Betone mit sinkendem äquivalenten Wasserzementwert infolge des dichteren Gefüges ab. Die gesamte Hg-Porosität und der in ihr enthaltene Kapillarporenanteil war bei den Mörteln der silikastaubhaltigen Betone geringer als bei den vergleichbaren Mörteln der Betone ohne Silikastaub. Daraus ergab sich, dass sich die Porosität der silikastaubhaltigen hochfesten Betone wesentlich im Bereich der Gelporen mit Porenradien $< 0,004 \mu\text{m}$ verschoben hatte, der nicht mittels Quecksilberdruckporosimetrie erfasst werden kann. Die gesamte Gelporosität der Betone ergab sich aus der Gesamtporosität unter Berücksichtigung der Hg-Porosität ($> 0,01 \mu\text{m}$) und dem Gehalt an Luftporen. Aus den Ergebnissen der Porengrößenverteilung wurde mit dem Grenzradius eine weitere charakteristische Größe zum Gefüge der Betone abgeleitet. Mit sinkendem äquivalenten Wasserzementwert verschoben sich die Grenzradien im Allgemeinen zu kleineren Porenradien. Dabei waren die Grenzradien der silikastaubhaltigen Mörtel kleiner als die der Mörtel ohne Silikastaub.

Bei der ganzheitlichen Betrachtung der Ergebnisse zur Hg-Porosität, zu den Anteilen an Gel- bzw. Kapillarporen sowie zum Grenzradius konnte kein allgemeingültiger Grenzwert für die verschiedenen Kennwerte herausgearbeitet werden. So konnte das unterschiedliche Verhalten der silikastaubhaltigen hochfesten Betone bei einer Frostbeanspruchung noch nicht hinreichend erklärt werden.

Eine frühe Mikrorissbildung bei den silikastaubhaltigen Betonen als Ursache für die starke Änderung des relativen dynamischen E-Moduls während des Frostversuchs konnte durch Untersuchungen zur kapillaren Wasseraufnahme und die visuelle Auswertung von Dünnschliffen nicht bestätigt werden.

5.6 Einflüsse des Feuchtigkeitshaushaltes auf den Frostwiderstand

5.6.1 Feuchtigkeitsverteilung

5.6.1.1 Multi-Ring-Elektrode

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollte exemplarisch die Feuchtigkeitsverteilung in Betonen ohne und mit Silikastaub ermittelt werden. Für die Untersuchungen wurden deshalb die Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ ohne (oS35) sowie mit Silikastaub (mS35) ausgewählt. Jeweils zwei Multi-Ring-Elektroden (MRE) und ein Temperaturfühler wurden beim Herstellen der CIF-Platten einbetoniert (siehe Abschnitt 4.3.5.3). Die Messung der elektrischen Widerstände erfolgte kontinuierlich und in Abhängigkeit von der Probekörperhöhe. Sie begann unmittelbar vor Beginn des kapillaren Saugens.

Die gemessenen elektrischen Widerstände entsprachen der Feuchtigkeit an jener Stelle im Beton. Über die Probekörperhöhe bzw. über die Versuchsdauer aufgetragen, ergaben sie eine qualitative Aussage zur Verteilung bzw. zur Entwicklung der Feuchtigkeit im Probekörperquerschnitt. Jedoch war ein Vergleich der Ergebnisse der Betone ohne und mit Silikastaub ebenso wie die Angabe von Feuchtigkeitsgehalten nicht möglich, da die MRE nicht für die verschiedenen Betone kalibriert wurden. Die mit Gleichung 4-4 temperaturkorrigierten, elektrischen Widerstände sind für den Beton oS35 der Tafel A-14 und für den Beton mS35 der Tafel A-15 zu entnehmen. Für beide Betone stellte sich der in Bild 5-34 wiedergegebene Zusammenhang für das 7tägige kapillare Saugen dar.

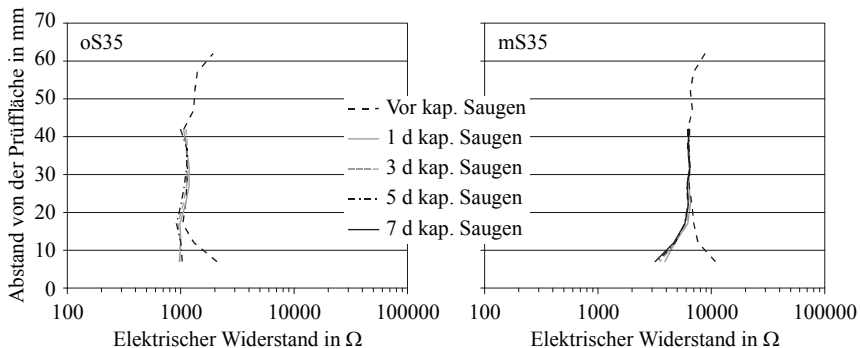


Bild 5-34: Feuchtigkeitsverteilung gemessen als elektrischer Widerstand in Abhängigkeit von der Tiefe und der Dauer des kapillaren Saugens; links Beton oS35; rechts Beton mS35

Beide Betonarten wiesen unmittelbar vor dem kapillaren Saugen einen für die Lagerung im Klimaraum bei 20 °C und 65 % rel. F. typischen Feuchtigkeitsverlauf auf. In einem weiten Bereich des Kernbetons blieb der elektrische

Widerstand jeweils annähernd konstant. Für den Beton oS35 betrug er ca. 1000 Ω und für den Beton mS35 rd. 6000 Ω bis 7000 Ω . Im oberflächennahen ca. 20 mm umfassenden Bereich nahm der elektrische Widerstand sowohl an der Prüffläche als auch an der Oberseite deutlich zu. Das bedeutete, dass der Beton in diesen Bereichen deutlich trockener war und sich ein Feuchtigkeitsgradient ausbildete. Aus diesen Bereichen der Oberfläche verdunstete Feuchtigkeit während der 21tägigen Lagerung im Klimaraum bei 20 °C und 65 % rel. F..

Während des kapillaren Saugens nahm der Beton ohne Silikastaub so viel Wasser innerhalb des ersten Tages auf, dass der Feuchtigkeitsgradient im oberflächennahen Bereich der Prüffläche ausgeglichen wurde. Der elektrische Widerstand lag zu diesem Zeitpunkt ebenso wie im Kernbeton bei rd. 1000 Ω . Obwohl der Beton auch nach dem ersten Tag weiteres Wasser kapillar aufnahm (siehe Bild B-2), änderte sich der elektrische Widerstand bis zum Ende des kapillaren Saugens praktisch nicht mehr. Die Feuchtigkeitsaufnahme beeinflusste lediglich den oberflächennahen Bereich.

Ähnliches traf auch auf den silikastaubhaltigen Beton mS35 zu. Der elektrische Widerstand änderte sich durch das kapillare Saugen nur im oberflächennahen, ca. 20 mm umfassenden Bereich innerhalb des ersten Tages. Ebenso nahm er über den gesamten Querschnitt nicht weiter ab, obwohl während der folgenden sechs Tage weiteres Wasser kapillar aufgenommen wurde. Im Gegensatz zu dem Beton ohne Silikastaub sank, bedingt durch die kapillare Wasseraufnahme, der elektrische Widerstand im oberflächennahen Bereich unter den Wert des Kernbereichs ab. Das bedeutete, dass im Vergleich zum Kernbeton der oberflächennahe Bereich feuchter war.

Die Ergebnisse der MRE-Untersuchung zum kapillaren Saugen bestätigten die in Abschnitt 5.5.2 getroffenen Aussagen zur großen Gefügedichtheit aller hochfesten Betone. Die Diagramme in Bild 5-35 – links ohne, rechts mit Silikastaub – geben die Verteilung des elektrischen Widerstands in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel wieder.

Im Beton ohne Silikastaub nahm der elektrische Widerstand im Verlauf des CIF-Versuchs nur geringfügig von ca. 1000 Ω vor Beginn der Frostbeanspruchung auf rd. 800 Ω nach 14 Frost-Tau-Wechseln bzw. rd. 500 Ω nach 42 Frost-Tau-Wechseln ab. Die Abnahme erfolgte in jedem Fall über den gesamten Querschnitt annähernd gleichmäßig. Dieses Verhalten ließ auf ein intaktes Gefüge schließen und stand im Einklang mit dem Ergebnis zur inneren Gefügeschädigung (siehe Abschnitt 5.3). Selbst nach 100 Frost-Tau-Wechseln veränderte sich bei diesem Beton der relative dynamische E-Modul praktisch nicht.

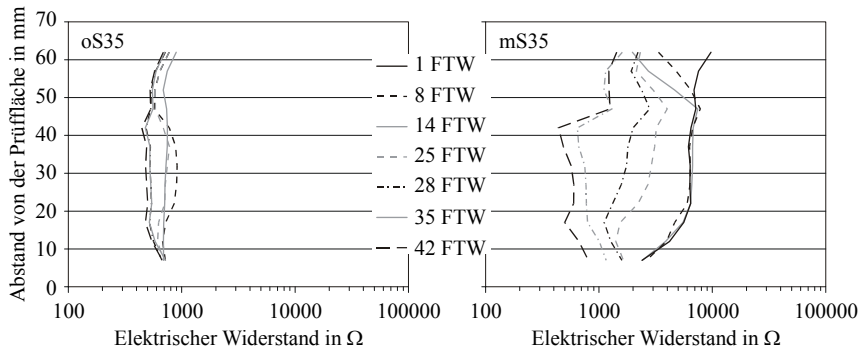


Bild 5-35: Feuchtigkeitsverteilung gemessen als elektrischer Widerstand in Abhängigkeit von der Tiefe und der Dauer der Frost-Tau-Wechsel; links Beton oS35; rechts Beton mS35

Bei dem silikastaubhaltigen Beton mS35 veränderte sich der elektrische Widerstand im oberflächennahen Bereich der Prüffläche und im Kernbeton bis zum 14. Frost-Tau-Wechsel gegenüber dem Zustand nach einem Tag kapillaren Saugen praktisch nicht. Lediglich auf der Oberseite der CIF-Platte nahm der elektrische Widerstand deutlich ab. Dies war auf die Kondenswasseraufnahme zurückzuführen. Kondenswasser bildet sich verfahrensbedingt beim CIF-Test auf der Probekörperoberseite während der Frost-Tau-Wechsel.

Nach 25 Frost-Tau-Wechseln nahm der elektrische Widerstand über die gesamte Querschnittsfläche deutlich ab. Dabei sank insbesondere die Differenz zwischen dem Kernbeton und den oberflächennahen Bereichen. Diese Abnahme bedeutete eine deutliche Erhöhung der Feuchtigkeit im gesamten Querschnitt und ließ auf den Beginn der inneren Gefügeschädigung schließen. Wurden die Ergebnisse mit denen zur inneren Gefügeschädigung und zur Wasseraufnahme verglichen (siehe Abschnitt 5.3), ergab sich ein enger Zusammenhang. Während bis zum 28. Frost-Tau-Wechsel praktisch keine Änderung des relativen dynamischen E-Moduls erkennbar war, fiel im Anschluss der relative dynamische E-Modul innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel stark ab. Dies war, wie in Bild 5-3 dargestellt, mit einer deutlich messbaren Wasseraufnahme verbunden, die auch aus dem rechten Diagramm von Bild 5-35 als weitere Abnahme des elektrischen Widerstands ablesbar war.

Dieser Zusammenhang wird auch in Bild 5-36 anschaulich. Es wurde die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls in Abhängigkeit von der Änderung des elektrischen Widerstands für beide Betone dargestellt. Die Änderung des elektrischen Widerstands ergab sich als Differenz zwischen dem elektrischen Widerstand vor dem kapillaren Saugen und nach einer bestimmten Anzahl Frost-Tau-Wechsel. Die eintretende Gefügeschädigung des silikastaub-

haltigen Betons mS35 nach ca. 28 Frost-Tau-Wechseln ging mit einer um ca. 5fach größeren Änderung des elektrischen Widerstand einher als bei dem ungeschädigten Beton oS35.

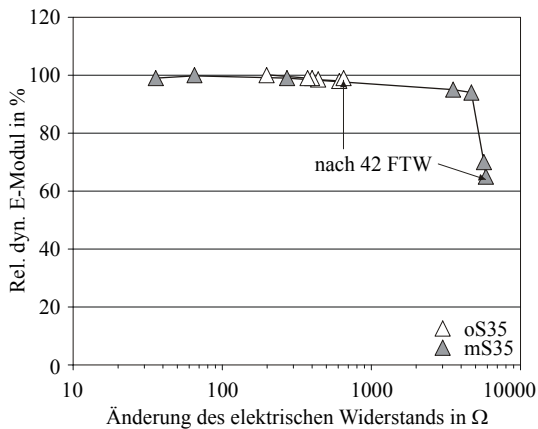


Bild 5-36: Änderung des relativen dynamischen E-Moduls in Abhängigkeit von der Änderung des elektrischen Widerstands der Betone oS35 und mS35

5.6.1.2 3D-Computertomographie

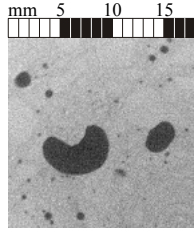
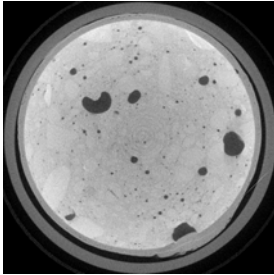
Neben der Visualisierung des Gefüges, wodurch mögliche Schäden und Schwachstellen bis zu einer Auflösung von ca. 40 μm sichtbar gemacht werden können (siehe Abschnitt 4.3.5.4), kann auf Grund der stark abweichenden Dichte von Wasser gegenüber Zementstein, Gesteinskörnern und Luft die Feuchtigkeitsverteilung mit Hilfe der dreidimensionalen Computertomographie dargestellt werden. Bild 5-37 zeigt 3D-CT-Aufnahmen des Bohrkerns aus dem Beton mS35 in einer Höhe von rund 2 mm vor (a) und nach dem kapillaren Saugen (b) sowie nach 42 Frost-Tau-Wechseln (c). Die unteren Aufnahmen (d) stellen jeweils ein Graustufendifferenzbild der beiden Aufnahmen (b) und c) dar. Mit Hilfe des Graustufendifferenzbild wird eine Erhöhung der Feuchtigkeit als heller Bereich besonders deutlich kenntlich. Bild 5-38 zeigt 3D-CT-Aufnahmen des selben Bohrkerns zu den gleichen Zeitpunkten aus einer Höhe von ca. 20 mm von der Prüffläche. Betonmatrix und Gesteinskörner wurden als helle Flächen, luftgefüllte Poren als schwarze Flächen dargestellt. Die Darstellung der Butylkautschukschicht mit Aluminiumfolie als seitliche Abdichtung des Bohrkerns erfolgte in einem hellen Grauton. Der in den Aufnahmen unmittelbar folgende dunklere Kreisring war der Träger des Bohrkerns in der CT-Apparatur. In annähernd dem selben Grauton wurde Wasser wiedergegeben.

Ein Vergleich der Bilder vor und nach dem kapillaren Saugen machte deutlich (Bilder a) und b)), dass die Poren sowohl in einem Abstand von rund 2 mm (Bild 5-37) als auch von ca. 20 mm von der Prüfoberfläche (Bild 5-38) nach dem kapillaren Saugen nicht mit Wasser gefüllt waren. Im oberflächennahen Bereich ließen die grauen Säume als Grenzfläche zwischen luftgefüllter Pore und Beton auf einen Wasserfilm an der Porenoberfläche schließen (siehe Detailaufnahmen). Solche grauen Säume konnten im tieferen Betongefüge, wie an Hand der 20 mm von der Prüfoberfläche entfernten Aufnahme beispielhaft gezeigt (Bild 5-38 b)), zu diesem Zeitpunkt nicht festgestellt werden. Die bei gleichen Helligkeits-, Kontrast- und Intensitätseinstellungen dunkleren Grautöne der Matrix im oberflächennahen Bereich im Vergleich zu denen im tieferen Betongefüge wurden dahingehend interpretiert, dass dieser Bereich eine höhere Feuchtigkeit aufwies.

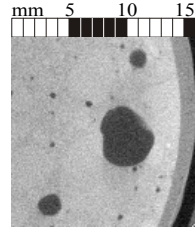
Die Wasseraufnahme des Bohrkerns stieg auf Grund der von Setzer thermodynamisch hergeleiteten „Frostpumpe“ [Set 02] und der beginnenden Schädigung des Gefüges, wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben, innerhalb kurzer Zeit während der Frostprüfung deutlich an. Sie betrug nach 42 Frost-Tau-Wechseln ca. 1,5 M.-%. Das zusätzlich in das Betongefüge aufgenommene Wasser ist gut in der linken Aufnahme in Bild 5-37 c) zu erkennen. Die im Vergleich zur oberen Aufnahme nun hellgrau dargestellten groben Poren belegten, dass die nach dem kapillaren Saugen nur befeuchteten aber noch nicht befüllten Poren des oberflächennahen Bereichs nach 42 Frost-Tau-Wechseln fast vollständig mit Wasser gefüllt waren. Im tieferliegenden Betongefüge waren auch zu diesem Zeitpunkt keine der groben Poren mit Wasser gefüllt (Bild 5-38 c)).

Die Grauwertdifferenzbilder zwischen den jeweiligen Aufnahmen vor Beginn und nach 42 Frost-Tau-Wechseln (Bild 5-37 d) und Bild 5-38 d)) ermöglichten Aussagen zur Veränderung des Feuchtigkeitsgehalts des Betons. Schwarze Flächen in diesen Aufnahmen bedeuten, dass infolge der 42 Frost-Tau-Wechsel kein zusätzliches Wasser im Gefüge des Betons nachweisbar war. Änderte sich die Dichte infolge einer Wasseraufnahme, ergab die Differenz einen neuen Grauwert. Die hellen Ränder im Bereich der seitlichen Abdichtungen und einzelner Poren waren darauf zurückzuführen, dass beide Aufnahmen nicht vollständig deckungsgleich sind. Dies ist technisch nur bedingt und unter erheblichen Aufwand realisierbar, da z. B. durch Risse infolge der Frostbeanspruchung die Lage der Gesteinskörner und Poren verändert werden. Die Übersichtsbilder und die daneben dargestellten vergrößerten Details aus den Grauwertdifferenzbildern veranschaulichen die Unterschiede im Wassergehalt in Abhängigkeit von der Lage im Beton. Die groben Poren in unmittelbarer Nähe der Prüffläche waren z. T. vollständig mit Wasser gefüllt.

2 mm von Prüffläche

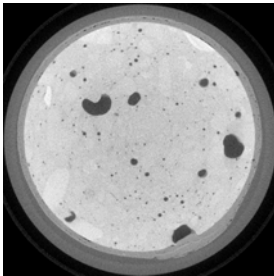


Detail 1

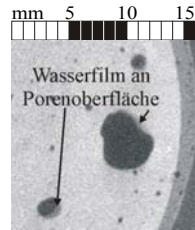


Detail 2

a) Vor dem kapillaren Saugen

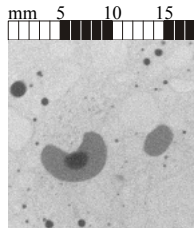
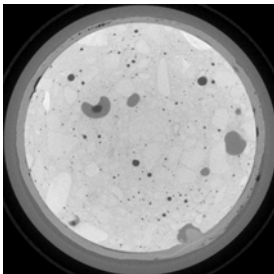


Detail 1

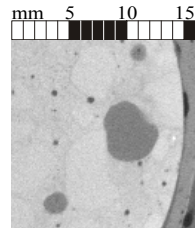


Detail 2

b) Nach dem kapillaren Saugen

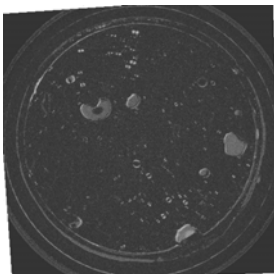


Detail 1



Detail 2

c) Nach 42 Frost-Tau-Wechseln



d) Greuwert-differenzbild

Bild 5-37: CT-Bilder durch den Querschnitt des Bohrkerns aus dem silikastaubhaltigen Beton mS35 im Alter von 28 Tagen, nach dem kap. Saugen, nach 42 Frost-Tau-Wechseln und Differenzbild nach dem kap. Saugen und 42 FTW zur Darstellung der Wasserverteilung

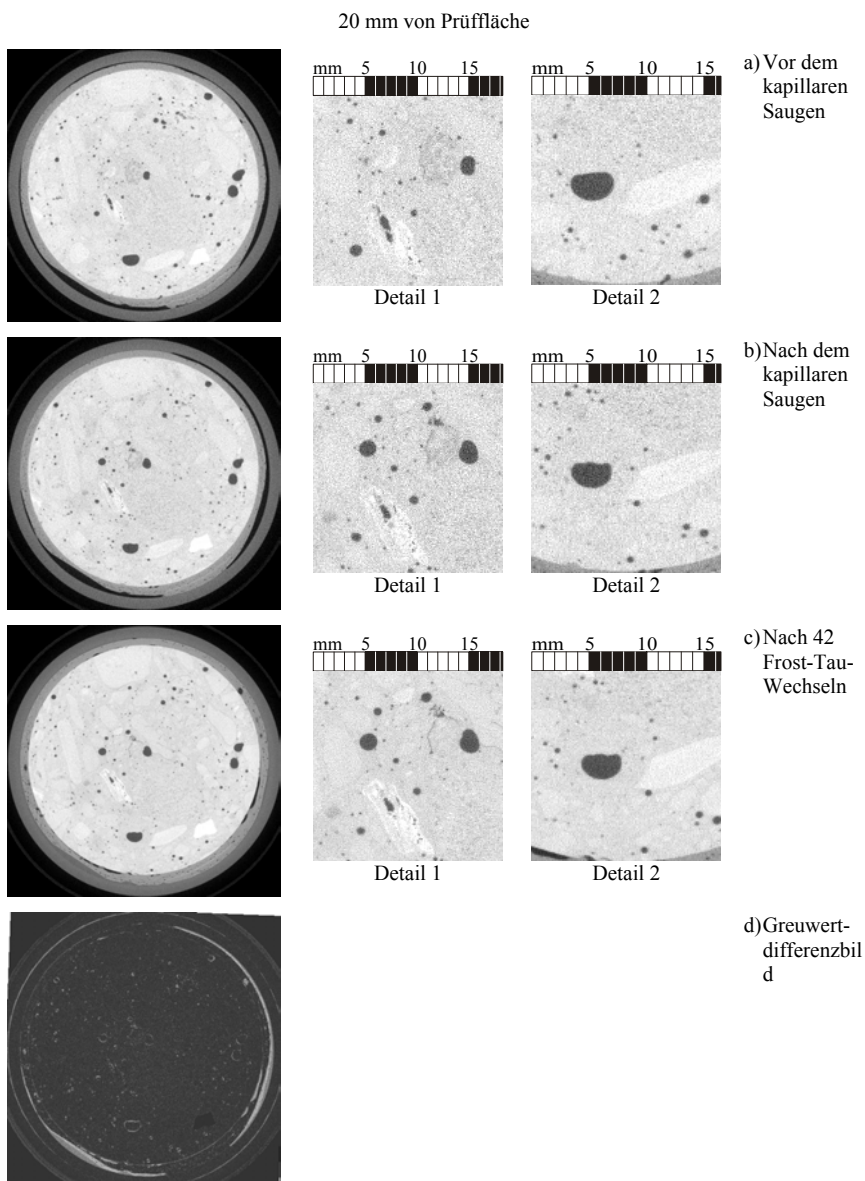


Bild 5-38: CT-Bilder durch den Querschnitt des Bohrkerns aus dem silikastaubhaltigen Beton mS35 im Alter von 28 Tagen, nach dem kap. Saugen, nach 42 Frost-Tau-Wechseln und Differenzbild nach dem kap. Saugen und 42 FTW zur Darstellung der Wasserverteilung

Jedoch ließ sich die deutliche Wasseraufnahme nach 42 Frost-Tau-Wechseln, die auf Grund der Messungen mit Hilfe der Multi-Ring-Elektrode auch das tiefere Betongefüge des silikastaubhaltigen Betons erreicht haben muss (Abschnitt 5.6.1.1), nur vermuten. Ursache hierfür war die mit der verwendeten 3D CT-Anlage erreichbare Auflösung von maximal 40 μm , mit der der maßgebliche Porenraum der hochfesten Betone (siehe Abschnitt 5.5.2) und eintretende Mikrorisse nicht erfasst wurden. Eine Darstellung der Feuchtigkeit in diesem Porenraum und in den Mikrorissen war deshalb auch mit Hilfe der Grauwertdifferenzbilder nicht möglich.

5.6.2 *Wassergehalt*

5.6.2.1 *Physikalisch gebundenes Wasser*

Der physikalisch gebundene, d. h. der bei 105 °C verdampfbare, Wassergehalt wurde im Alter von 28 Tagen sowohl an den hochfesten Betonen als auch an den separat hergestellten Mörteln der Betone bestimmt. Die Ergebnisse enthält Tafel A-16. Der Einfluss des Silikastaubs auf das physikalisch gebundene Wasser bei normgemäßer Lagerung ist in Bild 5-39 für die hochfesten Betone (links unten) und für die separat hergestellten Mörtel (links oben) in Abhängigkeit des äquivalenten Wasserzementwertes dargestellt. Der bei 105 °C verdampfbare Wassergehalt nahm mit steigendem äquivalenten Wasserzementwert erwartungsgemäß sowohl für die Zusammensetzungen ohne als auch mit Silikastaub zu. Dabei wiesen unabhängig vom äquivalenten Wasserzementwert die silikastaubhaltigen Zusammensetzungen ca. 20 bis 25 % mehr physikalisch gebundenes Wasser auf als die vergleichbaren Zusammensetzungen ohne Silikastaub. Zu Beginn der Frostbeanspruchung enthielten sie somit deutlich mehr physikalisch gebundenes Wasser.

Dieser höhere Gehalt an potentiell gefrierbarem Wasser gab einen ersten Hinweis auf die Unterschiede bei der Änderung des relativen dynamischen E-Moduls während der Frostbeanspruchung der hochfesten Betone ohne und mit Silikastaub. Die Prüfung des Frostwiderstands mit dem CIF-Verfahren und dem Balkenverfahren erfolgte entsprechend den Prüfanweisungen an Probekörpern, die eben nach dieser normgemäßen Lagerung nachbehandelt wurden. Daher war zu klären, ob silikastaubhaltige Zusammensetzungen generell einen höheren physikalisch gebundenen Wassergehalt aufweisen oder ob die Lagerung entsprechend den Prüfvorschriften eine für die Prüfung des Frostwiderstands von silikastaubhaltigen hochfesten Betonen ungünstige Nachbehandlung darstellt. Die Ergebnisse wären dann als Prüfartefakte zu werten.

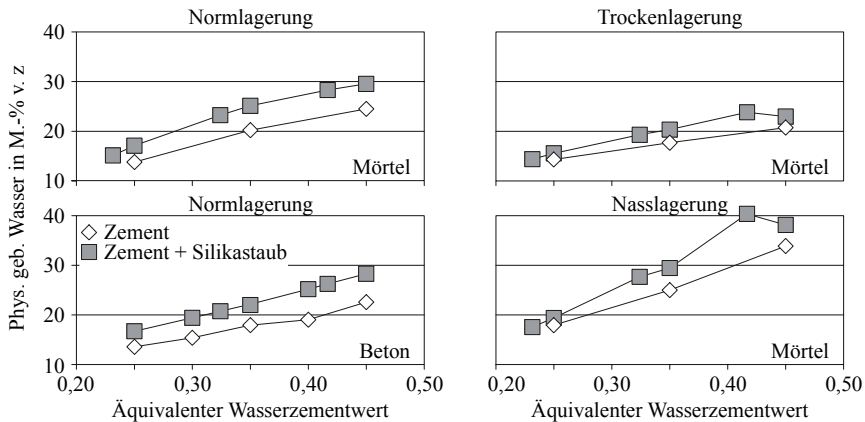


Bild 5-39: Physikalisch gebundenes Wasser der Betone und Mörtel bei normgemäßer Lagerung, Trockenlagerung und Nasslagerung im Alter von 28 Tagen

Aus diesem Grund wurden einerseits Mörtel entsprechend Abschnitt 4.2.2 bei zwei extremen Lagerungsregimes (trocken und nass) nachbehandelt. Im Alter von 28 Tagen wurde der Gehalt an physikalisch gebundenem Wasser bestimmt. Andererseits verblieben hochfeste Betone mit $(w/z)_{eq}$ von 0,45, 0,35 und 0,25 ohne und mit Silikastaub 270 Tage im Klimaraum 20 °C und 65 % relative Luftfeuchtigkeit, um an ihnen den Einfluss einer verlängerten Austrocknungsphase zu ermitteln. Die Ergebnisse enthält ebenfalls Tafel A-16 im Anhang.

Den Einfluss der Trockenlagerung auf das physikalisch gebundene Wasser für die untersuchten Mörtel zeigt das rechte obere Diagramm in Bild 5-39. Für die Mörtel, die bis zum 28 Tag unter Wasser bei 20 °C lagerten, sind die Verhältnisse im rechten unteren Diagramm dieses Bildes veranschaulicht. Im Vergleich zur normengemäßen Nachbehandlung nahm der physikalisch gebundene Wassergehalt erwartungsgemäß bei der Trockenlagerung ab und bei der Nasslagerung zu. In jedem Fall wiesen aber die silikastaubhaltigen Mörtel mehr physikalisch gebundenes Wasser auf als die Mörtel ohne Silikastaub. Die Lagerungsart beeinflusste bei den Mörteln den Gehalt an verdampfbaren Wasser mit steigendem $(w/z)_{eq}$ zunehmend. Bei der Trockenlagerung wiesen die silikastaubhaltigen Mörtel bei $(w/z)_{eq} = 0,25$ rd. 10 % und bei $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ ca. 15 % mehr physikalisch gebundenes Wasser auf. Wurden die Mörtel bis zur Prüfung 28 Tage unter Wasser gelagert (Nasslagerung) betrug der Unterschied bei $(w/z)_{eq} = 0,25$ annähernd 10 % bzw. bei $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ ungefähr 20 %.

Eine Verlängerung der Klimaraumlagerung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit beeinflusste, wie in Bild 5-40 dargestellt, den bei 105 °C verdampfbaren Wassergehalt des silikastaubhaltigen Mörtels mit $(w/z)_{eq} = 0,25$

und der Mörtel ohne Silikastaub praktisch nicht. Durch eine auf 270 Tage verlängerte Lagerung der Probekörper im Klimaraum verdunstete bei den silikastaubhaltigen Mörteln mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ etwas mehr physikalisch gebundenes Wasser als bei den Probekörpern, die nur 21 Tage im Klimaraum lagerten. Dennoch enthielten diese Mörtel nach wie vor deutlich mehr physikalisch gebundenes Wasser als die vergleichbaren Mörtel ohne Silikastaub. Das Ergebnis belegte auch die im Abschnitt 5.5.2 diskutierten Zusammenhänge zur Porosität und Dichtheit des Gefüges der hochfesten Betone und wurde von Untersuchungen z. B. von [Gus 98] zur Durchlässigkeit von hochfesten Betonen gegenüber Luft bzw. Sauerstoff bestätigt.

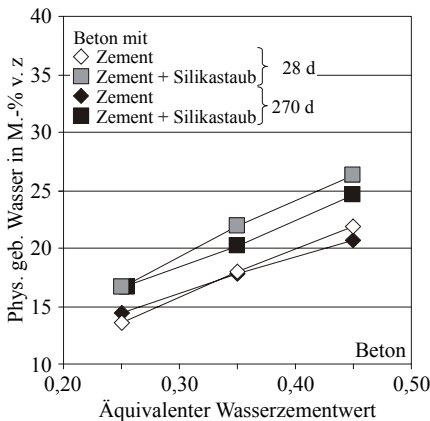


Bild 5-40: Veränderung des physikalisch gebundenen Wassers der Betone bei normgemäßer Lagerung im Alter von 28 Tagen bzw. 270 Tagen

5.6.2.2 Chemisch gebundenes Wasser

Nachdem das physikalisch gebundene Wasser der separat hergestellten Mörtel und der hochfesten Betone im Alter von 28 Tagen, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, bestimmt wurde, wurden die Proben bei 950 °C geblüht, um den Gehalt an chemisch gebundenen Wasser zu bestimmen. Tafel A-17 enthält die Ergebnisse, während Bild 5-41 die Zusammenhänge getrennt für die drei Nachbehandlungsarten aufzeigt. Mit steigendem äquivalenten Wasserzementwert nahm der Gehalt an chemisch gebundenen Wasser zu. Zwischen den drei verschiedenen Nachbehandlungsarten waren kaum Unterschiede feststellbar. Lediglich die Mörtel der Trockenlagerung wiesen im Vergleich zur normgemäßen Lagerung und zur Nasslagerung geringfügig kleinere Werte auf. Das war auf eine geringere Hydratation auf Grund der mangelnden Nachbehandlung zurückzuführen. Gleichzeitig zeigten die Ergebnisse der Normlagerung im Vergleich zur Nasslagerung, dass sie eine für die Hydratation von Mörtel oder Beton mit Portlandzement günstige Nachbehandlung darstellt. Unabhängig vom

Silikastaubgehalt bauten die Mörtel auf Grund der Hydratation annähernd gleich viel Wasser in das Gitter der CSH-Phasen ein. Die Untersuchung an den Betonen lieferte tendenziell eine ähnliche Aussage, fand aber keine weitere Berücksichtigung in der Darstellung der Ergebnisse.

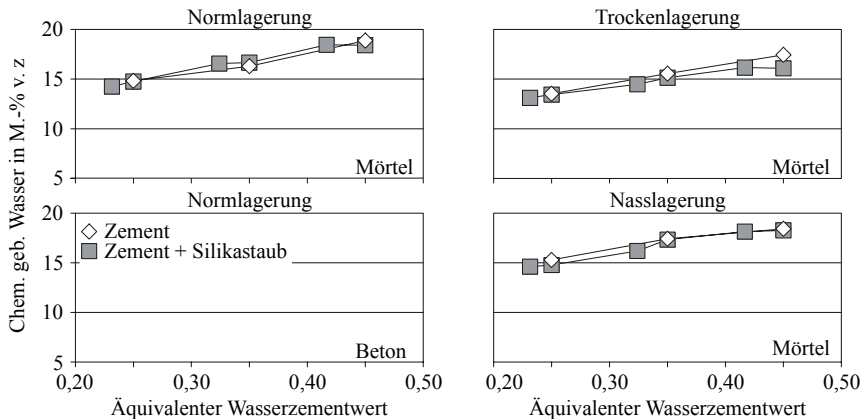


Bild 5-41: Chemisch gebundenes Wasser der Betone und Mörtel bei normgemäßer Lagerung, Trockenlagerung und Nasslagerung im Alter von 28 Tagen

5.6.3 Zusammenfassung

Silikastaubhaltige Betone wiesen nach dem kapillaren Saugen und während der ersten Frost-Tau-Wechsel einen signifikanten Feuchtigkeitsgradienten zwischen Prüfoberfläche und tieferen Betongefüge auf. Mit Einsetzen der Schädigung erhöhte sich die Feuchtigkeit im Betoninneren deutlich und der Feuchtigkeitsgradient nahm sukzessive ab. Die Ergebnisse mit der Multi-Ring-Elektrode korrespondierten gut mit der im CIF-Verfahren bestimmten Änderung des relativen dynamischen E-Moduls. Ein Feuchtigkeitsgradient konnte an den Betonen ohne Silikastaub nicht festgestellt werden. Das während der Frost-Tau-Wechsel aufgenommene Wasser verteilte sich über den gesamten Betonquerschnitt annähernd gleichmäßig.

Im oberflächennahen Bereich der Betone war nach dem kapillaren Saugen die Oberfläche der groben Poren befeuchtet. Bei dem silikastaubhaltigen Beton mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ waren diese Poren nach 42 Frost-Tau-Wechseln fast vollständig mit Wasser gefüllt.

Der Gehalt an chemisch und physikalisch gebundenem Wasser nahm mit steigendem äquivalenten Wasserzementwert zu. Silikastaubhaltige Mischungen

wiesen unabhängig davon, wie die Mörtel oder Betone nach der Herstellung gelagert wurden, einen höheren Gehalt an physikalisch gebundenem Wasser auf als die vergleichbaren Zusammensetzungen ohne Silikastaub. Im Gegensatz dazu war der Gehalt an chemisch gebundenem Wasser bei den Zusammensetzungen mit und ohne Silikastaub bei gleichem äquivalenten Wasserzementwert annähernd identisch.

Auch eine deutliche Verlängerung der Austrocknungszeit auf 270 Tage im Klimaraum bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit führte nur zu einer geringfügigen Abnahme des Gehalts an physikalisch gebundenem Wasser gegenüber dem 28-Tage-Wert. Dieser höhere Gehalt an potentiell gefrierbarem Wasser gab einen Hinweis auf die während der Frostbeanspruchung beobachtete Änderung des relativen dynamischen E-Moduls der silikastaubhaltigen Betone mit einem $(w/z)_{eq} \geq 0,35$. Die Ursachen für den unterschiedlichen Gehalt an potentiell gefrierbarem Wasser lagen in dem Reaktionsablauf der silikastaubhaltigen Mischungen, der im Abschnitt 5.8 diskutiert wird.

5.7 Einfluss des Porenfüllungsgrades auf den Frostwiderstand

Der Frostwiderstand wird, wie in Bild 2-1 dargestellt, von den Kenngrößen zum Gefüge (Abschnitt 5.5) und zum Feuchtigkeitsgehalt (Abschnitt 5.6) maßgeblich beeinflusst. Jedoch konnten mit den jeweiligen Kenngrößen allein die Unterschiede im Frostwiderstand der silikastaubhaltigen hochfesten Betone nicht beschrieben werden. Als dritte wesentliche Einflussgröße wurde in Bild 2-1 der relative Porenfüllungsgrad (RPFG) der Betone benannt, der sich aus dem Verhältnis des Gesamtfeuchtegehalts (w_f), d. h. dem in den Poren enthaltenen potentiell gefrierbaren Wasser, und der Gesamtporosität (w_{15MPa}) ergibt. Der Gesamtfeuchtegehalt berücksichtigt das physikalisch gebundene Wasser im Alter von 28 Tagen sowie die Wassergehalte, die die Probekörper kapillar bzw. während der Frost-Tau-Wechsel aufnehmen. Teile des physikalisch gebundenen Wassers befindet sich in Poren, in denen auf Grund der Porenradialen Wasser bei Temperaturen bis – 20 °C nicht gefrieren kann [Bru 77, Sto 79]. Litvan [Lit 72] und Setzer [Set 02] haben jedoch in ihren theoretischen Überlegungen hergeleitet, dass durch die zyklische Frost-Tau-Wechsel-Belastung das Wasser in diesen Poren durch thermodynamische Potentialunterschiede aktiviert wird. Es bewegt sich während der Frostperiode zum makroskopischen Eis in größeren Kapillarporen und gefriert [Set 02]. Es erscheint somit notwendig, diesen Anteil als potentiell gefrierbares Wasser ebenfalls zu erfassen.

Prinzipiell steigt der RPFG mit zunehmendem Gesamtfeuchtegehalt an. Gefügeschäden treten allerdings erst auf, wenn für das gefrierende Wasser nicht ausreichend Ausweichraum (Poren) zur Verfügung steht. Diesen bei eintreten-

der Schädigung vorhandenen RPFG bezeichnete Fagerlund als „kritische Sättigung“ [Fag 97]. Theoretisch ist sie bei einem RPFG von 91 % auf Grund der ca. 9 %igen Volumenzunahme beim Phasenübergang von Wassers zu Eis erreicht. Die gestrichelte Linie in Bild 5-42 kennzeichnet diese theoretische kritische Sättigung.

Die Ergebnisse zum RPFG der Betone enthält Tafel A-18. Für die Betone ohne und mit Silikastaub zeigt Bild 5-42 den RPFG in Abhängigkeit des äquivalenten Wasserzementwertes im Alter von 28 Tagen, nach dem kapillaren Saugen sowie nach 14 Frost-Tau-Wechseln.

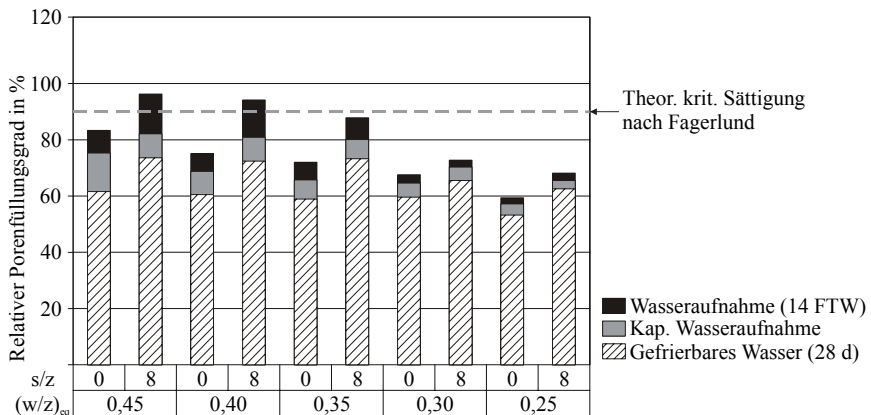


Bild 5-42: Relativer Porenfüllungsgrad (RPFG) der Betone im Alter von 28 Tagen, nach 7 Tagen kapillarem Saugen und 14 Frost-Tau-Wechseln

Potentiell gefrierbares Wasser füllte die Poren der Betone ohne Silikastaub zu rund 60 % unabhängig vom äquivalenten Wasserzementwert. Lediglich der RPFG des Betons ohne Silikastaub mit $(w/z)_{eq} = 0,25$ (oS25) war mit ca. 55 % etwas kleiner. Silikastaubhaltige Betone wiesen trotz der 7 – 9 %igen höheren Gesamtporosität im Vergleich zu den entsprechenden Betonen ohne Silikastaub im Alter von 28 Tagen einen höheren RPFG auf, da sie ca. 25 % mehr physikalisch gebundenes Wasser enthielten (siehe Abschnitte 5.5.2.2 und 5.6.2.1). Auffällig war, dass die Poren der silikastaubhaltigen Betone bei einem $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ zu ca. 73 % gefüllt waren, während der RPFG bei $(w/z)_{eq} < 0,35$ nur bei etwas über 60 % lag. Dieser Unterschied war insbesondere von Bedeutung, da der relative dynamische E-Modul der silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel stark abfiel.

Bei gleichen äquivalenten Wasserzementwerten ($(w/z)_{eq} \leq 0,40$) nahmen, wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben, die Betone ohne und mit Silikastaub annähernd

gleich viel Wasser kapillar auf. Nach dem 7tägigen kapillaren Saugen stieg deshalb der RPFPG für die Betone ohne und mit Silikastaub mit fallendem äquivalenten Wasserzementwert entsprechend um 4 – 8 % an. Die silikastaubhaltigen Betone, deren relativer dynamischer E-Modul innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel abfiel, wiesen unmittelbar vor Beginn der Frostbeanspruchung einen RPFPG von ca. 80 % auf (Bild 5-42 graue Säulen). Die kapillare Wasseraufnahme des Betons ohne Silikastaub mit $(w/z)_{eq} = 0,45$ (oS45) war wegen der deutlich größeren Kapillarporosität und der höheren Vernetzung der Poren (siehe Abschnitte 5.5.2.3 und 5.5.2.6) annähernd doppelt so hoch wie bei dem vergleichbaren Beton mit Silikastaub (mS45). Der RPFPG nahm deshalb deutlich um rd. 14 % zu, so dass die Poren nach dem kapillaren Saugen zu ca. 75 % befüllt waren. Bei allen anderen Betonen ohne Silikastaub lag der RPFPG zu diesem Zeitpunkt z. T. deutlich unter 70 %.

Mit Beginn der Frost-Tau-Wechsel nahmen die Betone weiteres Wasser durch die von Setzer hergeleitete „Frostpumpe“ auf [Set 02]. Die frostbedingte Wasseraufnahme war bei gleichen äquivalenten Wasserzementwerten für Betone ohne und mit Silikastaub annähernd gleich, solange kein Abfall des relativen dynamischen E-Moduls und damit eine Gefügeschädigung infolge der Frostbeanspruchung auftrat. Durch das innerhalb von 14 Frost-Tau-Wechseln zusätzlich aufgenommene Wasser überstieg der RPFPG der silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq} \geq 0,40$ die theoretische kritische Sättigung von 91 % und der silikastaubhaltige Beton mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ erreichte sie. Dies steht in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen des CIF-Verfahrens. Die relativen dynamischen E-Moduln der beiden Betone, deren RPFPG die theoretische kritische Sättigung überstieg, waren zu diesem Zeitpunkt schon deutlich auf 82 bzw. 90 % des Ausgangswertes abgefallen. Der Beton (mS35), bei dem der RPFPG die theoretische kritische Sättigung erreichte, wurde innerhalb der folgenden Frost-Tau-Wechsel messbar geschädigt. Die frostbedingte Wasseraufnahme dieser Betone war deutlich größer als die der anderen Betone, an denen während des CIF-Tests innerhalb von 100 Frost-Tau-Wechseln keine oder nur eine geringfügige (oS45) Änderung des relativen dynamischen E-Moduls feststellbar war. Der RPFPG des Betons ohne Silikastaub (oS45) mit der geringfügigen Änderung des relativen dynamischen E-Moduls betrug rd. 83 %, während bei den anderen Betonen ohne Silikastaub die Poren maximal zu 75 % gefüllt waren.

Ein Überschreiten der von Fagerlund in [Fag 97] definierten kritischen Sättigung war somit die Ursache für die innere Gefügeschädigung der silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ als Folge der Frostbeanspruchung. Die Darstellung der Änderung des relativen dynamischen E-Moduls in Abhängigkeit des zum gleichen Zeitpunkts berechneten RPFPG der CIF-Platten verdeutlicht diesen Zusammenhang anschaulich (Bild 5-43). Die Kurvenscharen für die

Betone mit und ohne Silikastaub in Bild 5-43 verliefen innerhalb eines engen Bereichs. Die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls in Abhängigkeit des RPFG stellt für die untersuchten hochfesten Betone mit $(w/z)_{eq}$ zwischen 0,25 und 0,45 somit einen guten Zusammenhang dar. Eine Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls auf 80 % seines Ausgangswertes kann als Beginn einer deutlichen inneren Gefügeschädigung angenommen werden [Hei 03].

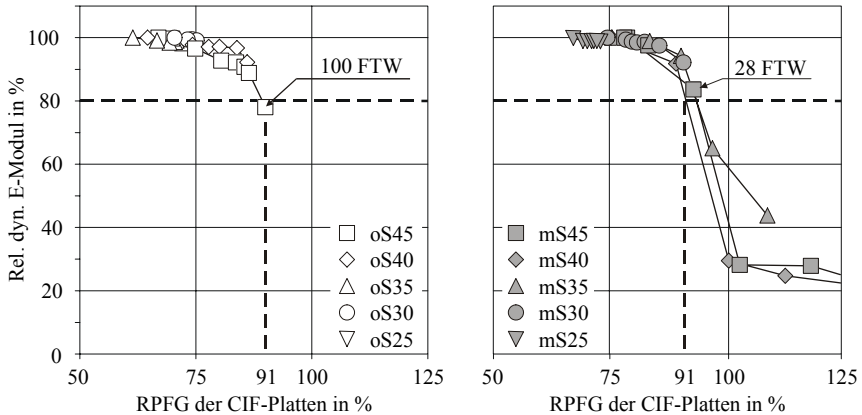


Bild 5-43: Relativer dynamischer E-Modul in Abhängigkeit von der Sättigung der Betone
links ohne Silikastaub, rechts mit 8 M.-% Silikastaub

Erreichte der relative Porenfüllungsgrad (RPFG) einen Wert von 91 %, betrug der relative dynamische E-Modul rd. 80 % seines Ausgangswertes. Das Gefüge der Betone wies somit zu diesem Zeitpunkt eine deutliche Schädigung infolge der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung auf. Durch eine weitere Frostbeanspruchung fiel der relative dynamische E-Modul stark ab, während der RPFG im selben Zeitraum anstieg. Der RPFG konnte einen Wert von 100 % überschreiten, weil im Bereich der durch die Frostbeanspruchung aufgetretenen Gefügeschäden zusätzliches Wasser aufgenommen wurde.

Entsprechend der zuvor getroffenen Aussage ist in Bild 5-43 zu erkennen, dass sowohl der Beton ohne Silikastaub (oS45) als auch der vergleichbare silikastaubhaltige Beton (mS45) bei einem relativen dynamischen E-Modul von ca. 80 % einen RPFG von annähernd 91 % aufwies. Während der Beton ohne Silikastaub diesen RPFG erst nach 100 Frost-Tau-Wechseln erreichte, waren für den silikastaubhaltigen Beton lediglich 28 Frost-Tau-Wechsel notwendig. Deshalb ist zu vermuten, dass eine kritische Sättigung erreicht werden kann, wenn die Prüfung lange genug andauert. Das Einstellen einer kritischen Sättigung ist somit kein Nachweis des Frostwiderstands hochfester Betone.

Vielmehr ist für die Beurteilung des Frostwiderstands von Bedeutung, in welchem Zeitraum sie erreicht wird.

Der zur Verfügung stehende Porenraum der silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ war, wie aus Bild 5-42 hervorgeht, schon zu Beginn der Frost-Tau-Wechsel deutlich stärker gesättigt, als der der übrigen hochfesten Betone. Eine kritische Sättigung konnte sich während der ersten Frost-Tau-Wechsel zumindest lokal einstellen, wodurch es zu dem Abfall des relativen dynamischen E-Moduls innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel kam.

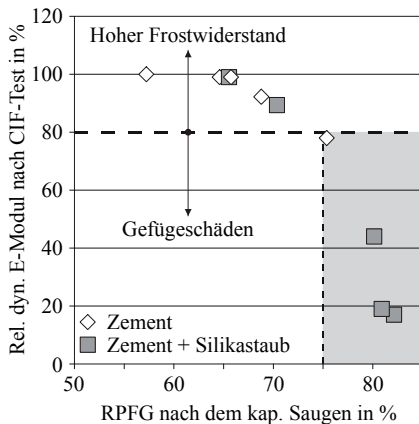


Bild 5-44: Zusammenhang zwischen relativem dynamischen E-Modul und dem relativen Porenfüllungsgrad nach dem kapillaren Saugen

Bild 5-44 bestätigt diesen Zusammenhang. Betone mit RPFPG nach dem kapillaren Saugen < 75 % wiesen auch nach 100 Frost-Tau-Wechseln lediglich eine geringe Änderung des relativen dynamischen E-Moduls auf. Bei größeren RPFPG nach dem kapillaren Saugen traten z. T. deutliche Gefügeschäden infolge der Frostbeanspruchung auf. Mit Hilfe des RPFPG nach dem kapillaren Saugen konnte eindeutig zwischen hohem und nicht ausreichenden Frostwiderstand der untersuchten hochfesten Betone unterschieden werden.

5.8 Einfluss der Zementhydratation und der Reaktion des Silikastaubs auf den Gehalt an physikalisch gebundenen Wasser

5.8.1 Unhydratisierter Zement bzw. Zement und Silikastaub

Mit der ^{29}Si NMR-Spektroskopie wurde die Bindungsform des Siliciumdioxids in den untersuchten Leimen als chemische Verschiebung bestimmt (siehe Abschnitt 4.3.6.5). Die Bindungsformen, ausgedrückt als (Q^0) - bis (Q^4) -Gruppen, sind in Tafel 4-4 den chemischen Verschiebungen zugeordnet. Die entsprechenden (Q^n) -Gruppen sind kennzeichnend für ggf. enthaltenen unhydra-

tisierten Zement (Q^0), Rand- (Q^1) und Mittelgruppen (Q^2) der CSH-Phasen, Alkalisilikate (Q^3) sowie amorphen Silikastaub (Q^4).

Bild 5-45 zeigt entsprechende NMR-Spektren der Zementleime ohne und mit Silikastaub, die unmittelbar nach der Herstellung entsprechend Abschnitt 4.3.6.1 abgestoppt wurden. Die Flächenintegrale unterhalb der entsprechenden Peaks geben die Menge an entsprechend gebundenen Siliciumatomen an und können den Tafeln A-20 und A-21 entnommen werden. Erwartungsgemäß wies das Spektrum des Zementleims ohne Silikastaub (Bild 5-45 links) nur ein breites Signal zwischen rd. -66 ppm und -77 ppm auf, das den (Q^0)-Gruppen zugeordnet werden konnte. Eine Fouriertransformation des Signals ergab einen scharfen Peak bei ca. $-70,8$ ppm, der in Übereinstimmung mit Literaturdaten [Cla 84, Hjo 88] dem C_3S (Alit) entspricht. Dieser Peak wurde von einem breiten Peak überlagert, der dem C_2S (Belit) zuzuordnen war.

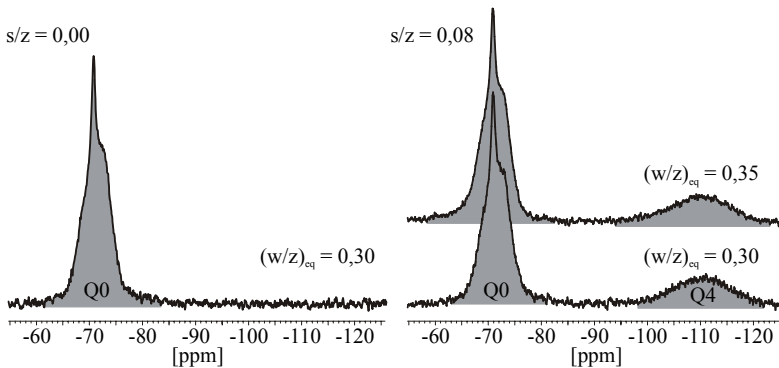


Bild 5-45: ^{29}Si -HPDEC/MAS-Spektren der Zementleime ohne und mit Silikastaub 10 Minuten nach der Wasszugabe

Die silikastaubhaltigen Leime mit $(w/z)_{eq} = 0,30$ bzw. $0,35$ enthielten entsprechend ihrer Zusammensetzung 92,6 M.-% Zement und 7,4 M.-% Silikastaub. Ihre NMR-Spektren (Bild 5-45 rechts) waren annähernd identisch, da durch das unmittelbare Abstoppen der Leime nach der Herstellung keine Hydratation stattfinden konnte. Es war zum Einen ein dem Leim ohne Silikastaub vergleichbarer Peak im Bereich zwischen rd. -66 ppm und -77 ppm feststellbar. Zum Anderen wies das Spektrum einen zweiten signifikanten Peak im Bereich zwischen rd. -100 ppm und -120 ppm auf. Dieser Peak repräsentierte die (Q^4)-Gruppen des amorphen Silikastaubs. Das Verhältnis der Flächenintegrale der Hauptgruppen (Q^0) und (Q^4) spiegelt die Zusammensetzung des Leims wieder. Demnach wiesen die Leime 76 % (Q^0) Gruppen und 24 % (Q^4) Gruppen (mS30) bzw. 75 % (Q^0) und 25 % (Q^4) Gruppen (mS35) auf. Die

Ergebnisse deckten sich sehr gut mit dem aus den chemischen Analysen des Zements und des Silikastaubs (Tafel A-1) berechnetem theoretischen Verhältnis von 72 % (Q^0)-Gruppen und 28 % (Q^4)-Gruppen. Eine solch gute Übereinstimmung zwischen theoretischer Berechnung und Messergebnis belegte die Qualität der Untersuchungsmethode und wurde u. a. auch von Dobson et al. gefunden [Dob 88].

5.8.2 *Hydratation des Zements*

Das Erhärten des Zements beruht auf der Hydratation der silikatischen Klinkerhauptbestandteile C_3S und C_2S zu Calciumsilikathydraten, CSH-Phasen. Da diese im Vergleich zu den Klinkerbestandteilen CaO ärmer sind, bildet sich bei der Hydratation $Ca(OH)_2$. Die CSH-Phasen sind schwach kristallin ausgebildet und entsprechen in ihrer Grundstruktur dem Kettensilikat Tobermorit. Deshalb ist diese Reaktion (Hydratation) in den NMR-Spektren durch eine Abnahme der (Q^0)-Gruppen bei gleichzeitiger Ausbildung von (Q^1)- und (Q^2)-Gruppen gekennzeichnet. Die prozentuale Veränderung des Flächenintegrals der (Q^0)-Gruppen gegenüber dem Ausgangswert nach der Herstellung beschrieb den Hydratationsgrad α des Zements zu einem bestimmten Zeitpunkt. Er ist für die Zusammensetzungen ohne und mit Silikastaub in Tafel 5-4 enthalten.

Die Bilder 5-46 und 5-47 stellen die NMR-Spektren der Zementleime ohne und mit Silikastaub mit $(w/z)_{eq} = 0,45$, $0,35$ und $0,25$ im Alter von 28 Tagen im Vergleich zu den entsprechenden Ausgangspektren unmittelbar nach der Herstellung dar. Schon der rein visuelle Vergleich der Spektren zeigte, dass mit steigendem äquivalenten Wasserzementwert die Hydratation beschleunigt wurde. Die Berechnung des Hydratationsgrades aus der Veränderung der (Q^0) Flächenintegrale bestätigte diese Beobachtung (Tafel 5-4). Im Alter von 28 Tagen betrug er für die Zusammensetzung ohne Silikastaub mit $(w/z)_{eq} = 0,25$ rd. 42 % und stieg bei $(w/z)_{eq} = 0,35$ auf rd. 63 % und bei $(w/z)_{eq} = 0,45$ auf rd. 70 % an. Der Austausch von Zement durch Silikastaub führte zu einer Beschleunigung der Hydratation. Im Alter von 28 Tagen waren bei einem $(w/z)_{eq} = 0,25$ bei dem Leim ohne Silikastaub rd. 42 % Zement umgesetzt während bei dem silikastaubhaltigen Leim zum gleichen Zeitpunkt bereits rd. 51 % Zement reagiert hatten. Dagegen blieb, ähnlich wie bei den Untersuchungen von Hjorth [Hjo 88], im Alter von 28 Tagen der Hydratationsgrad für die Zusammensetzungen ohne und mit Silikastaub bei einem $(w/z)_{eq} = 0,45$ mit $\alpha = 69$ % bzw. 70 % annähernd gleich.

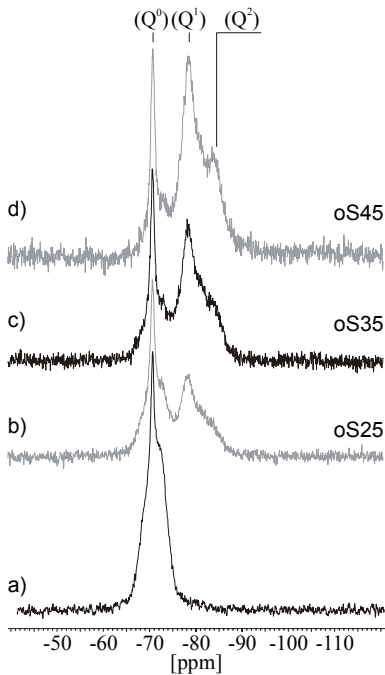


Bild 5-46: NMR-Spektren der Zementleime,

- a) Ausgangsspektrum
- b) oS25 im Alter von 28 d
- c) oS35 im Alter von 28 d
- d) oS45 im Alter von 28 d

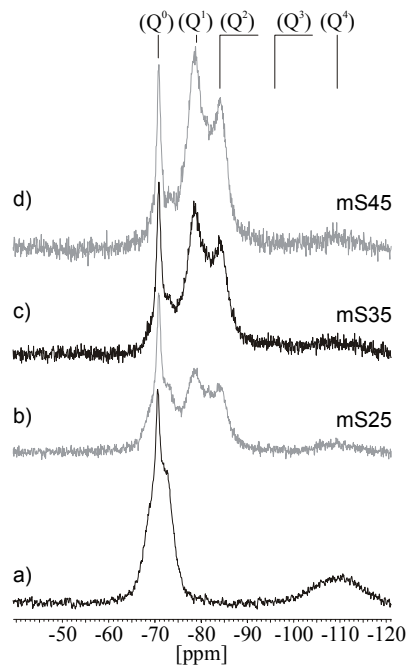


Bild 5-47: NMR-Spektren der silikastaubhaltigen Zementleime

- a) Ausgangsspektrum
- b) oS25 im Alter von 28 d
- c) oS35 im Alter von 28 d
- d) oS45 im Alter von 28 d

Mit steigendem Hydratationsgrad des Zements veränderten sich auch Menge und Zusammensetzung der CSH-Phasen. Bei geringen äquivalenten Wasserzementwerten bildeten sich durch die Hydratation hauptsächlich (Q¹)-Gruppen, also Randgruppen der CSH-Ketten. Die Menge an (Q¹)-Gruppen stieg an, wenn sich der äquivalente Wasserzementwert erhöhte. Daneben enthielten die Spektren zunehmend Peaks im Bereich der (Q²)-Gruppen bei rd. – 83 ppm (Bild 5-46 Spektren c) und d)). Demnach stieg nicht nur die Menge an CSH-Phasen, sondern auch deren mittlere Kettenlänge an. Ähnliches traf auch auf die silikastaubhaltigen Leime zu, wobei bezogen auf den Zementgehalt die Anteile der (Q¹)- und (Q²)-Gruppen zunahmen. Diese Zunahme ist auf die puzzolanische Reaktion des Silikastaubs zurückzuführen. Ferner wurde insbesondere bei Leimen mit geringen äquivalenten Wasserzementwerten die Hydratation des Klinkers in den silikastaubhaltigen Leimen beschleunigt.

Tafel 5-4: Hydratationsgrad des Zements und Silikastaubverbrauch der konserviert gelagerten Zementsteinproben im Alter von 28 Tagen

Proben- bezeichnung	(w/z) _{eq}	Hydratationsgrad α	Silikastaubverbrauch	
			NMR-Spektroskopie (nach 4.3.6.5)	MSS-Aufschluss (nach 4.3.6.3)
oS45	0,45	70 %	-	-
mS45		71 %	77 %	75 %
oS35	0,35	63 %	-	-
mS35		66 %	61 %	-
oS25	0,25	42 %	-	-
mS25		51 %	66 %	71 %

Mit Hilfe der STA (Abschnitt 4.3.6.2) wurde die Masseabnahme während der Temperaturerhöhung von 105 °C auf 1000 °C bestimmt. Aus den Ergebnissen konnten in Verbindung mit der Differenz-Thermoanalyse die Gehalte an chemisch gebundenem Wasser und Calciumhydroxid berechnet werden. Die Ergebnisse enthält Tafel A-19. Ferner enthält die Übersicht den physikalisch gebundenen Wasseranteil, der aus der Differenz zwischen Zugabewasser und chemisch gebundenem Wasser berechnet wurde.

Bild 5-48 illustriert den Zusammenhang zwischen dem chemisch gebundenen Wasser der Zementleime ohne und mit Silikastaub im Alter von 28 Tagen und dem äquivalenten Wasserzementwert. Demnach banden die untersuchten Leime ohne und mit Silikastaub bei gleichem äquivalenten Wasserzementwert annähernd dieselbe Menge Wasser chemisch ein. Nur der silikastaubhaltige Leim mit $(w/z)_{eq} = 0,25$ enthielt mehr chemisch gebundenes Wasser als der vergleichbare Leim ohne Silikastaub. Dies war auf die beschleunigte Hydratation, bedingt durch den Austausch des Zements mit Silikastaub, zurückzuführen.

Der Gehalt an physikalisch gebundenem Wasser der silikastaubhaltigen Zementleime war im Vergleich zu den Leimen ohne Silikastaub größer. Die Ergebnisse bestätigten die in Abschnitt 5.6.2.2 beschriebenen Mörteluntersuchungen bei verschiedenen Lagerungsvarianten.

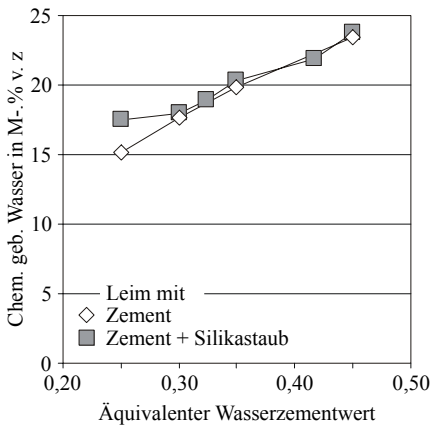


Bild 5-48: Mit STA-Analyse ermitteltes chemisch gebundenes Wasser der Leimproben im Alter von 28 Tagen

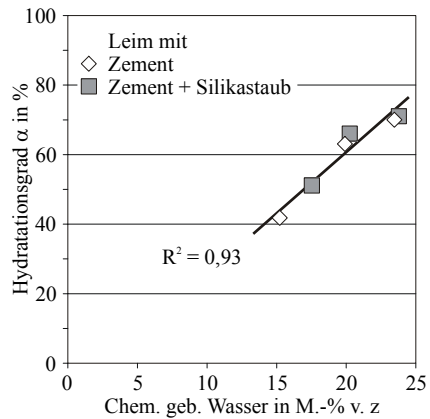


Bild 5-49: Korrelation des aus der NMR-Spektroskopie ermittelten Hydratationsgrad mit dem mittels STA-Analyse bestimmten chemisch gebundenen Wasser der Leimproben im Alter von 28 Tagen

Dieser zuvor angedeutete Zusammenhang zwischen Hydratationsgrad und chemisch gebundenem Wasser wird in Bild 5-49 deutlich. Der mit Hilfe der NMR-Spektren berechnete Hydratationsgrad der Leime stieg unabhängig vom Silikastaubgehalt an. Im Alter von 28 Tagen nahm der Hydratationsgrad mit steigendem Gehalt an chemisch gebundenem Wasser linear zu, unabhängig davon, ob die Leime Silikastaub enthielten. Auf Grund der strengen Proportionalität zwischen beiden Größen konnte damit nachgewiesen werden, dass bei der puzzolanischen Reaktion des Silikastaubs mit dem Calciumhydroxid aus der Zementhydratation kein zusätzliches Wasser chemisch in die neu gebildeten CSH-Phasen eingebunden wurde.

5.8.3 Reaktionsverhalten des Silikastaubs

Zusammensetzungen mit Silikastaub enthielten, wie in Abschnitt 5.6.2.1 diskutiert, systematisch mehr bei 105 °C verdampfbares und somit potentiell gefrierbares Wasser als vergleichbare Zusammensetzungen ohne Silikastaub. Die Ursache muss in der Art liegen, wie der Silikastaub während der Hydratation des Zements reagiert.

Silikastaub reagiert mit dem bei der Hydratation der Klinkerbestandteile gebildeten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ebenfalls zu festigkeitsbildenden Calciumsilikathydraten (CSH-Phasen). Vergleichbar zur Zementhydratation ist diese Reaktion durch

eine Abnahme der Ausgangsgruppe, (Q^4)-Gruppe, bei gleichzeitiger Ausbildung von (Q^1)- und (Q^2)-Gruppen in den NMR-Spektren gekennzeichnet. Deshalb wurde der Umsatz des Silikastaubs an Hand der Veränderung der Flächenintegrale der (Q^4)-Gruppen der silikastaubhaltigen Leime unmittelbar nach der Herstellung sowie im Alter von 28 Tagen berechnet.

Das Flächenintegral der (Q^4)-Gruppen nahm im Alter von 28 Tagen mit steigendem äquivalenten Wasserzementwert ab. Das bedeutet, dass sich im Zuge der 28tägigen Lagerung mehr Silikastaub bei höheren äquivalenten Wasserzementwerten umsetzte. Wie in Tafel 5-4 zusammengestellt, betrug der umgesetzte Anteil Silikastaub bei $(w/z)_{eq} = 0,25$ rd. 66 % und stieg auf rd. 78 % bei $(w/z)_{eq} = 0,45$ an. Die Ergebnisse in Tafel 5-4 und das in den Spektren b) bis d) aus Bild 5-47 erkennbare Signal der (Q^4)-Gruppen belegten, dass unabhängig vom äquivalenten Wasserzementwert ein nicht unerheblicher Anteil des Silikastaubs unreaktiert blieb. Dies bestätigten u. a. auch Untersuchungen von Brough et al., Dobson et al. oder Justnes, die abhängig vom Zement und äquivalentem Wasserzementwert einen unreaktierten Silikastaubanteil zwischen 5 und 40 % bezogen auf die Silikastaubeinsatzmenge feststellten [Dob 88, Bro 97, Jus 98].

Parallel zu den NMR-Untersuchungen erfolgte an den Leimen im Alter von 28 Tagen eine Bestimmung des unlöslichen Rückstandes mit Hilfe des MSS-Aufschlusses nach Abschnitt 4.3.6.3. Die Rückstände enthielten entsprechend dem Prüfverfahren ggf. unreaktierten Silikastaub und Teile des Erstarrungsreglers. Untersuchungen an den Rückständen der Leime mit $(w/z)_{eq} = 0,45$ sowie der Silikastaubsuspension mit dem „Environmental Scanning Electron Microscope“ (ESEM) und mittels der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) nach Abschnitt 4.3.6.4 bestätigten diese Annahme.

In Bild B-19 ist der Rückstand des Silikastaubs bei 20000facher Vergrößerung aufgenommen. Unzählige kugelige Silikastaubpartikel belegten, dass der Silikastaub nicht von dem Gemisch aus Methanol, Salz- und Salicylsäure angegriffen wurde. Ähnlich viele Silikastaubpartikel fanden sich bei gleicher Vergrößerung in dem Rückstand des 10 Minuten nach der Herstellung abgestoppten Leims mS45 (Bild B-20). Unreaktierter Silikastaub war somit auch in Zement-Silikastaub-haltigen Leimen mit dem MSS-Aufschluss nachweisbar.

Der Rückstand des nach 28 Tagen abgestoppten Zementleims (oS45) konnte nur Sulfatträger und unreaktierten Klinker des Portlandzements enthalten. Dieser in Bild B-21 dargestellte Rückstand war auch in den silikastaubhaltigen Leimen (mS45) enthalten, die 10 Minuten (Bild B-20) bzw. 28 Tage nach der Herstellung (Bild B-22) abgestoppt wurden. Zusätzlich war unter dem ESEM in dem Rückstand des im Alter von 28 Tagen abgestoppten silikastaubhaltigen

Leims (mS45) unreagerter Silikastaub zu erkennen (Bild B-22). Die Untersuchungen mit dem ESEM belegten, die Güte der aus den MSS-Rückstände mit Gleichung 4-6 erfolgten Berechnung des reagierten Silikastaubanteils A_r .

Für die puzzolanische Reaktion des Silikastaubs wird Calciumhydroxid verbraucht, das durch die Zementhydratation entstand. Der Gehalt an Ca(OH)_2 bezogen auf die Zementmasse berechnete sich aus den Ergebnissen der Thermoanalyse. Er ist ebenfalls in Tafel A-19 enthalten und getrennt für die Leime ohne und mit Silikastaub in Bild 5-50 in Abhängigkeit des äquivalenten Wasserzementwertes aufgetragen. Mit steigendem äquivalenten Wasserzementwert nahm der Gehalt an Calciumhydroxid für die Leime ohne und mit Silikastaub jeweils annähernd linear zu. Die Differenz zwischen den Werten eines Leims ohne Silikastaub und des vergleichbaren Leims mit Silikastaub ergab den Verbrauch an Ca(OH)_2 infolge der puzzolanischen Reaktion bei einem bestimmten äquivalenten Wasserzementwert, wobei der geringere Gehalt an Zement in den silikastaubhaltigen Leimen berücksichtigt wurde. Der Ca(OH)_2 -Verbrauch war, wie Bild 5-50 anschaulich darstellt, für die untersuchten Leime unabhängig vom äquivalenten Wasserzementwert annähernd gleich. Er betrug rd. 3,2 bis 3,5 g je 100 g Zement (Tafel 5-5).

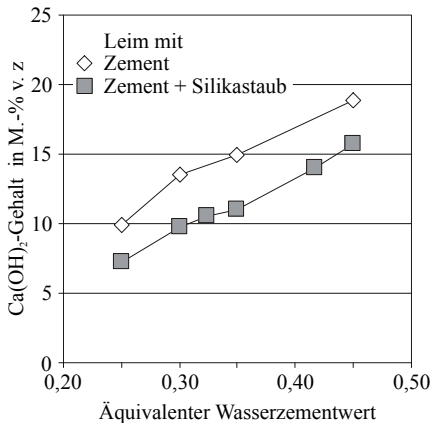


Bild 5-50: Mit Thermoanalyse ermittelter Ca(OH)_2 -Gehalt der Leimproben im Alter von 28 Tagen

5.8.4 Stöchiometrie der CSH-Phasen

Die Zusammensetzung der bei normaler Temperatur durch die Hydratation von C_2S und C_3S gebildeten CSH-Phasen variiert in einem verhältnismäßig weitem Bereich. Deshalb liegen die Molverhältnisse von Calcium zu Silicium (C/S-Verhältnis) abhängig von den stofflichen Voraussetzungen und dem Hydratationsgrad in einem Bereich zwischen 0,8 und 2,0 [u. a. Loc 00, Vie 96]. Für

CSH-Phasen von Portlandzement gaben u. a. Richardson oder Taylor einen Wert von ungefähr 1,7 an [Ric 99, Tay 86]. Eine überschlägige Berechnung der C/S-Verhältnisse der verschiedenen Leime ohne Silikastaub mit den Ergebnissen zur chemischen Zusammensetzung und der NMR-Spektroskopie (siehe Tafel A-1 und Tafel 5-4) bestätigten diese Angabe.

Die Reaktionsprodukte der puzzolanischen Reaktion des Silikastaubs mit dem Calciumhydroxid können auf Grund der stofflichen Veränderung der Ausgangsstoffe eine andere Morphologie aufweisen als die CSH-Phasen der Zementhydratation. Das beinhaltet eine höhere Vernetzung der CSH-Phasen und damit verbunden auch eine veränderte Stöchiometrie. Zum Verständnis des beobachteten höheren Gehalts an physikalisch gebundenem und damit potentiell gefrierbarem Wasser ist es daher notwendig, die durch den Einsatz von Silikastaub hervorgerufenen Veränderungen der CSH-Phasen zu betrachten. Die stöchiometrische Zusammensetzung der bei der puzzolanischen Reaktion gebildeten CSH-Phasen wurde näherungsweise aus dem Reaktionsgrad der Bestandteile, deren chemischer Zusammensetzung und dem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Umsatz (siehe Tafel 5-4), Tafel A-1 und Tafel A-19) berechnet. Die Ergebnisse sind in Tafel 5-5 dargestellt. Bei der Berechnung der C/S-Verhältnisse fanden weitere Reaktionen, bei denen Calcium benötigt wird, wie z. B. die Bildung von Calciumaluminat-hydraten keine Berücksichtigung.

Tafel 5-5: Hydratationsgrad des Zements und Silikastaubverbrauch der konserviert gelagerten Zementsteinproben im Alter von 28 Tagen

Bezeichnung	(w/z) _{eq}	Ca(OH) ₂ – Verbrauch		NMR (nach 4.3.6.5)		SiO ₂ – Verbrauch			
		g / 100 g	mol	g / 100 g	mol	C/S	MSS-Aufschluss (nach 4.3.6.3)		C/S
							g / 100 g	mol	
mS45	0,45	3,3	0,045	5,4	0,090	0,5	5,2	0,086	0,5
mS35	0,35	3,1	0,042	4,3	0,071	0,6	-	-	-
mS25	0,25	2,9	0,039	4,6	0,076	0,5	4,9	0,081	0,5

Das C/S-Verhältnis der Reaktionsprodukte des Silikastaubs lag unabhängig vom äquivalenten Wassorzementwert und von der Untersuchungsmethode, mit der der Umsatz des Silikastaubs bestimmt wurde, zwischen 0,5 und 0,6. Das bedeutete, dass sich calciumarme Reaktionsprodukte bildeten. Die untere Stabilitätsgrenze der CSH-Phasen liegt nach dem Strukturmodell des Tobermorits bei einem C/S-Verhältnis von 0,9 [Wei 89]. Demnach reichte das umgesetzte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nicht aus, um den gelösten Silikastaubanteil vollständig zu stabilen CSH-Phasen umzusetzen. Folglich gaben die geringen C/S-Verhältnisse unmittelbar einen Hinweis darauf, dass die Umsetzung des Silikastaubs zu einer

Koexistenz von stabilen CSH-Phasen und Alkalisilikaten führte. Bild 5-51 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

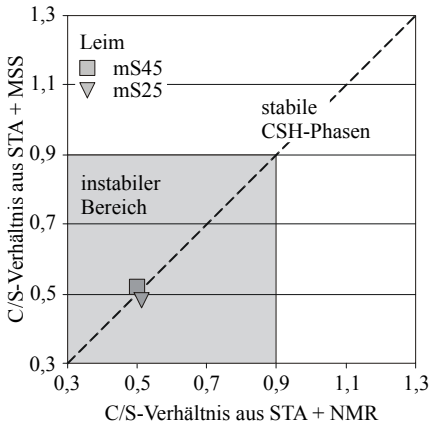


Bild 5-51: Gegenüberstellung der C/S-Verhältnisse berechnet aus Methanol, Salz- und Salicylsäureaufschluss (MSS) und Thermoanalyse sowie NMR-Spektroskopie und Thermoanalyse

Mikrobereichsanalysen an Zementsteinen silikastaubhaltiger Zemente im Alter von 28 Tagen und 91 Tagen von Schäfer führten zu den gleichen Schlussfolgerungen [Sch 04]. In diesen Untersuchungen wiesen CSH-Phasen, die der Klinkerhydratation zugeordnet werden konnten, C/S-Verhältnisse zwischen 1,7 und 1,8 auf. Im Vergleich dazu waren die Reaktionsprodukte des Silikastaubs wesentlich siliciumreicher. Die C/S-Verhältnisse in [Sch 04] lagen in einem weiten Bereich zwischen 0,4 und 0,9.

Für die Bildung stabiler CSH-Phasen konnte unter den beiden Voraussetzungen, dass

- stabile CSH-Phasen ein C/S-Verhältnis von mindestens 0,9 aufweisen müssen [Wei 89] und
- mit dem verbrauchten Ca(OH)_2 ausschließlich CSH-Phasen gebildet wurden, ein theoretischer Silikastaubverbrauch von rd. 3 g je 100 g Zementstein berechnet werden. Die verbleibenden überschlägig 2 g umgesetzter Silikastaub (siehe Tafel 5-5), die nicht durch die puzzolanische Reaktion zu stabilen CSH-Phasen reagierten, konnten mit den in der Porenlösung befindlichen Alkalien Alkalisilikate bilden. Entsprechend dem Angebot an Wasser im System binden diese Alkalisilikate mehr oder weniger viel Wasser physikalisch in das System ein. Tafel A-19 enthält die mit der STA gewonnenen Ergebnisse zum Wasserhaushalt der untersuchten Leime im Alter von 28 Tagen. Demnach sank mit sinkendem äquivalenten Wasserzementwert der Gehalt an physikalisch gebundenem Wasser, das an die hygroskopisch wirkenden Alkalisilikate angelagert werden kann. Der Unterschied zwischen dem silikastaubhaltigen

Leim mit $(w/z)_{eq} = 0,25$ und den Leimen mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ bzw. $0,45$ kam bei der Betrachtung des Verhältnisses zwischen physikalisch gebundenem Wasser und dem nicht zu stabilen CSH-Phasen umgesetzten Silikastaub zum Ausdruck. Während das Wasser zu Silikastaub Verhältnis des erstgenannten Leims bei ca. 4 lag, stieg es ab $(w/z)_{eq} = 0,35$ auf rd. 10 an. Das bedeutet, dass dem Alkalisilikat deutlich mehr Wasser zur Verfügung stand, das eingelagert werden konnte. Der physikalisch an die Alkalisilikate gebundene Wasseranteil ist prinzipiell gefrierbar. Zu diesen Aussagen kamen u. a. Scherer oder die Fa. Shimadzu [Sch 93, Shi 04]. Während Scherer von einer Rissbildung beim Frieren von „Silikagel“ berichtete, wurden in [Shi 04] Mindestwassergehalte angegeben, ab denen Porenwasser der Alkalisilikate froh.

Auch bei wasserreichen Alkalisilikaten bleibt die Struktur erhalten. Selbst in Lösungen liegt das SiO_4^{4-} nicht dissoziiert vor. Alkalisilikate bestehen aus Dimeren, Trimeren und Oligomeren in flächiger bzw. räumlicher Ketten- oder Ringform, deren Mengen in Abhängigkeit vom SiO_4^{4-} zu Alkali Verhältnis variieren [Cog 03]. Die Bestandteile verursachen wegen ihrer zwei bzw. dreidimensionalen Ausbildung in NMR-Spektren charakteristische Peaks in Bereichen der (Q^2) -, (Q^3) - und (Q^4) -Gruppen. Durch einen Abfall des pH-Wertes in der Porenlösung, der durch die puzzolanische Reaktion des Silikastaubs mit dem $Ca(OH)_2$ hervorgerufen wird, beginnen die Silikatspezies zu polymerisieren. Dadurch wird zuerst die Bildung von Strukturen, die (Q^3) -Gruppen entsprechen und bei weiterer Polymerisation die Bildung von (Q^4) -Gruppen begünstigt. Silikastaubhaltige Zementleime bieten durch das Alkaliangebot der Porenlösung sowie durch die Abnahme des pH-Wertes günstige Voraussetzungen für die Bildung von z. B. (Q^3) -Gruppen Strukturen.

Die untersuchten silikastaubhaltigen Zementleime mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ bzw. $0,45$ enthielten in den NMR-Spektren (Q^3) -Gruppen. Ihr Anteil an der Gesamtpeakfläche war mit rd. 6 bzw. 3 % gering. Schon in [Bro 97, Con 98] wurde von (Q^3) -Gruppen in NMR-Spektren silikastaubhaltiger Leime berichtet. Als Ursache vermuteten die Wissenschaftler ein Calcium modifiziertes Silikagel. Die Ergebnisse bestätigten auf der Basis der zuvor getroffenen Überlegungen und den in der Literatur beschriebenen Beobachtungen, dass der umgesetzte Silikastaub neben stabilen CSH-Phasen Alkalisilikate bildete. Auf Grund des höheren physikalischen Wasserangebots waren die hygroskopisch wirkenden Alkalisilikate der Leime mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ deutlich wasserreicher.

5.8.5 Zusammenfassung

Die Hydratation der Zementleime 28 Tage nach der Herstellung war abhängig vom Wasserzementwert. Mit steigendem Wasserzementwert stieg der Hydra-

tationsgrad. Der Einsatz von Silikastaub beschleunigte insbesondere bei niedrigeren äquivalenten Wasserzementwerten ($(w/z)_{eq} = 0,25$) die Zementhydratation. Zwischen Hydratationsgrad und chemisch gebundenem Wasser bestand ein linearer Zusammenhang. Daraus folgte, dass die puzzolanische Reaktion des Silikastaubs nur mit dem aus der Zementhydratation gebildeten Calciumhydroxid ablief und kein zusätzliches Wasser benötigte.

Im Alter von 28 Tagen verblieben in den silikastaubhaltigen Leimen ähnlich wie bei [Dob 88, Bro 97, Jus 98] beträchtliche Mengen an Silikastaub unreaktiert. Die unreaktierten Silikastaubpartikel wurden mit Hilfe von Aufnahmen mit dem ESEM visualisiert. Auf Grund des Calciumhydroxidverbrauchs bei der puzzolanischen Reaktion wurden für den reaktierten Anteil des Silikastaubs C/S-Verhältnisse von 0,5 bis 0,6 bestimmt. Da die Stabilitätsgrenze von Calciumsilikathydraten bei ca. 0,9 liegt [Wei 89], ist anzunehmen, dass sich stabile CSH-Phasen mit C/S-Verhältnissen $> ca. 0,9$ und Alkalisilikate bildeten. Letztere bilden u. a. (Q3)- Gruppenstrukturen, die in den NMR-Spektren der silikastaubhaltigen Leime mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ und $0,45$ nachgewiesen wurden. Alkalisilikate können auf Grund ihrer hygroskopischen Wirkung Wasser physikalisch binden. Durch das höhere Wasserangebot bei Zusammensetzungen mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ stellte sich ein Wasser zu Silikastaub Verhältnis von ca. 10 ein, während es bei dem silikastaubhaltigen Leim mit $(w/z)_{eq} = 0,25$ nur ca. 4 betrug. Der höhere Gehalt an physikalisch gebundenem Wasser bei den silikastaubhaltigen Betonen mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ kann hierdurch erklärt werden. Der Wasseranteil wasserreicher Alkalisilikate ist, wie auch Literaturangaben bestätigen, gefrierbar.

6 Qualitatives Modell zur Beschreibung des Frostwiderstands von dichten hochfesten Betonen

6.1 Beschreibung des Modells

6.1.1 Allgemeines

Aus der ganzheitlichen Betrachtung der Ergebnisse lässt sich ein qualitatives Modell zur Beschreibung des Frostwiderstands dichter hochfester Betone bei der Laborprüfung ableiten. Dabei wird die Porosität, der Feuchtigkeitsgehalt sowie die Wasseraufnahme berücksichtigt. Der Feuchtigkeitsgehalt hängt insbesondere von der Zusammensetzung des Betons sowie der Hydratation und ggf. von der puzzolanischen Reaktion ab. Somit können insgesamt vier Phasen unterschieden werden.

- Feuchtigkeitsgehalt und Porenfüllung während der Erhärtung
- Wiederbefeuchtung – Kapillare Wasseraufnahme

- Frost-Tau-Wechsel – Wasserumlagerung im Gefüge und zusätzliche Wasseraufnahme durch „Frostpumpe“
- Schädigung – Überschreiten der kritischen Sättigung

Im Folgenden werden die einzelnen Phasen an Hand der Untersuchungsergebnisse beschrieben. Dabei wird angenommen, dass das gesamte bei 105 °C verdampfbare Wasser infolge der von Litvan und Setzer beschriebenen thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten bei einem Frostangriff aktiviert werden kann [Lit 72, Set 99]. Das bedeutet, dass dieses zum Teil nicht gefrierbare Wasser der Gelporen während der Frost-Tau-Wechsel zu dem Eis, das sich in größeren Kapillarporen gebildet hat, transportiert wird und dort gefrieren kann.

6.1.2 1. Phase: Feuchtigkeitsgehalt und Porenfüllung während der Erhärtung

Bei der Erhärtung des Betons stellt sich ein für den jeweiligen Beton charakteristischer Feuchtigkeitsgehalt ein. Er hängt in erster Linie von dem äquivalenten Wassermenge ab, mit dem der Beton hergestellt wurde. Ferner wird er vom Hydratationsgrad des Zements bzw. vom Reaktionsgrad der Zusatzstoffe beeinflusst. Während der Hydratation bildet sich gleichzeitig das Gefüge und damit der bei einem Frostangriff zur Verfügung stehende Ausweichraum (Gesamtporosität) aus. Aus dem Verhältnis zwischen Feuchtigkeitsgehalt und Gesamtporosität berechnet sich der relative Porenfüllungsgrad (RPFPG).

Die silikastaubhaltigen Betone, die bei der anschließenden Prüfung des Frostwiderstands geschädigt wurden, wiesen im Alter von 28 Tagen mit ca. 73 % einen um mindestens 10 % höheren relativen Porenfüllungsgrad auf als die nach der Prüfung noch ungeschädigten Betone (siehe Bild 5-42). Der höhere RPFPG ist darauf zurückzuführen, dass diese Betone mehr Wasser physikalisch einbinden.

Der Grund für den höheren Gehalt an physikalisch gebundenem Wasser liegt in der Reaktion des Silikastaubs. Festigkeitsbildende, d. h. thermodynamisch stabile CSH-Phasen bilden sich, wenn das Molverhältnis von Calciumoxid und Siliciumdioxid einen Wert von 0,9 übersteigt [Wei 89]. Da die bestimmten C/S-Verhältnisse der Reaktionsprodukte des Silikastaubs zwischen 0,5 und 0,6 lagen (siehe Abschnitt 5.8.4), ist davon auszugehen, dass sich bei silikastaubhaltigen Betonen neben stabilen CSH-Phasen Alkalisilikate bilden. Diese Reaktion zwischen den Alkalien der Porenlösung und dem Silikastaub ist aus der Forschung u. a. zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion bekannt. Diese Alkalisilikate binden freies Wasser, das bei normalen

Lagerungsbedingungen nicht verdunstet, jedoch bei Temperaturen von bis zu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gefrierbar ist. Prinzipiell steht mit abnehmendem äquivalenten Wasserelementwert weniger freies Wasser zur Bildung wasserreicher Alkalisilikate zur Verfügung. Die silikastaubhaltigen Mörtel und Betone, insbesondere die mit einem $(w/z)_{\text{eq}} \geq 0,35$, besaßen deshalb mehr physikalisch gebundenes Wasser als die vergleichbaren Zusammensetzungen ohne Silikastaub.

Im Alter von 28 Tagen stellt sich somit das in Bild 6-1 dargestellte Verhältnis zwischen den ungeschädigten und den geschädigten silikastaubhaltigen Betonen ein.

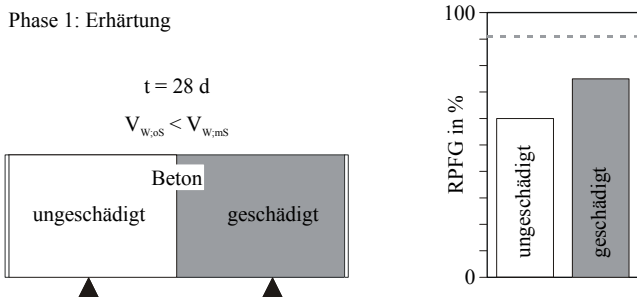


Bild 6-1: Vergleich der geschädigten und ungeschädigten Betone am Ende der Phase 1 (im Alter von 28 Tagen)

6.1.3 2. Phase: Wiederbefeuchtung – Kapillare Wasseraufnahme

Phase 2 beinhaltet die Wiederbefeuchtung des Betons bevor die ersten Frost-Tau-Wechsel auf das Gefüge einwirken. Sie wird durch die kapillare Wasseraufnahme der Betone beschrieben. Generell besitzen hochfeste Betone, die i. d. R. mit $(w/z)_{\text{eq}} \leq 0,40$ hergestellt werden, ein dichtes kapillarporenarmes Gefüge. Die Kapillarporosität verringert sich bei normgemäß nachbehandelten hochfesten Betonen mit $(w/z)_{\text{eq}} \leq 0,40$ durch den Einsatz von Silikastaub nur geringfügig. Deshalb nimmt die kapillare Wasseraufnahme durch den Einsatz von Silikastaub nur unwesentlich ab. Der relative Porenfüllungsgrad erhöht sich daher in allen Betonen um annähernd den gleichen Betrag.

Ab einem $(w/z)_{\text{eq}} \geq 0,45$ beginnt sich in den Betonen ohne Silikastaub ein mehr oder weniger stark vernetztes Kapillarporensystem auszubilden. Dies bewirkt einen deutlichen Anstieg der kapillaren Wasseraufnahme. Durch den Austausch von Zement gegen Silikastaub wird bei Betonen mit einem $(w/z)_{\text{eq}} \geq 0,45$ die Kontinuität des Porensystems u. a. durch den Füllereffekt des Silikastaubs

wirkungsvoll unterbrochen. Dadurch nimmt die kapillare Wasseraufnahme deutlich ab. Bild 6-2 zeigt schematisch den RPFG der ungeschädigten und der geschädigten silikastaubhaltigen Betone während Phase 2.

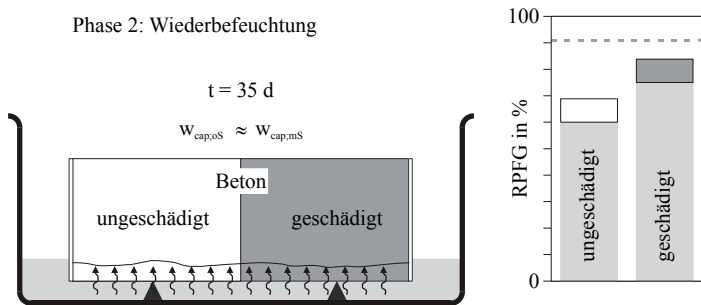


Bild 6-2: Vergleich der geschädigten und ungeschädigten Betone am Ende der Phase 2 (Wiederbefeuchtung)

6.1.4 3. Phase: Frost-Tau-Wechsel – Wasserumlagerung im Gefüge und zusätzliche Wasseraufnahme durch „Frostpumpe“

Die dritte Phase des Modells beschreibt die Vorgänge während der ersten Frost-Tau-Wechsel. Während die ersten beiden Phasen eindeutig zeitlich begrenzt sind, endet die dritte Phase erst, wenn die kritische Sättigung des Betons erreicht wird. Als Grundlage für diesen Teil des Modells werden die Mikroeislinientheorie von Setzer sowie die Überlegungen zur Wasserumlagerung im Gefüge von Betonen bei einer Frostbeanspruchung von Litvan und Setzer verwendet [Lit 72, Set 77, Set 99].

Auf Grund der thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten werden bei einem Frostangriff im Betongefüge Unterdrücke generiert. Diese führen zu einem Transport von ungefrorenem Gelporenwasser zum schon gefrorenen Wasser der Kapillarporen durch das Betongefüge. Des weiteren können die wasserreichen Alkalisilikate infolge dieser Kräfte entwässern und weiteres Wasser für eine Umlagerung zur Verfügung stellen. Bei einem Temperaturanstieg ist der Rücktransport in die Gelporen zunächst noch verhindert, da infolge der Radius-Gefrierpunkt-Beziehung das Eis in den Kapillarporen erst bei höheren Temperaturen auftaut. Somit wird über die Prüffläche zusätzliches Wasser von außen in das Betongefüge aufgesaugt.

Während der ersten Frost-Tau-Wechsel nehmen die silikastaubhaltigen Betone annähernd dieselbe Menge Wasser durch die „Frostpumpe“ auf wie die ver-

gleichbaren Betone ohne Silikastaub (siehe Bild 5-3). Deshalb steigt der relative Porenfüllungsgrad bei gleichem äquivalenten Wasserzementwert für beide Betonarten um nahezu den gleichen Betrag an. Infolge des höheren RPFPG der silikastaubhaltigen Betone mit einem $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ (siehe Phasen 1 und 2) wird dadurch die kritische Sättigung früher erreicht als bei den übrigen Betonen (Bild 6-3).

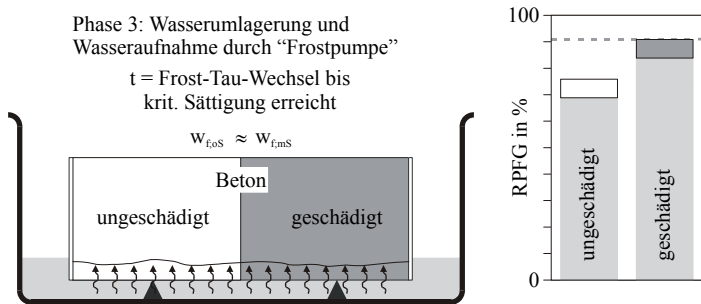


Bild 6-3: Vergleich der geschädigten und ungeschädigten Betone am Ende der Phase 3

6.1.5 4. Phase: Schädigung – Überschreiten der kritischen Sättigung

Die vierte Phase, die die Vorgänge während der Gefügeschädigung beschreibt, wird nur von Betonen mit einem unzureichenden Frostwiderstand erreicht. Sie ist gekennzeichnet durch einen rasant abfallenden relativen dynamischen E-Modul und einer hohen Wasseraufnahme innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel. Nicht nur der Porenraum sondern auch durch den Frostangriff entstandene Risse werden mit Wasser gefüllt. Dadurch ergibt sich bezogen auf die Gesamtporosität des ungeschädigten Gefüges ein RPFPG von mehr als 100 % (Bild 6-4).

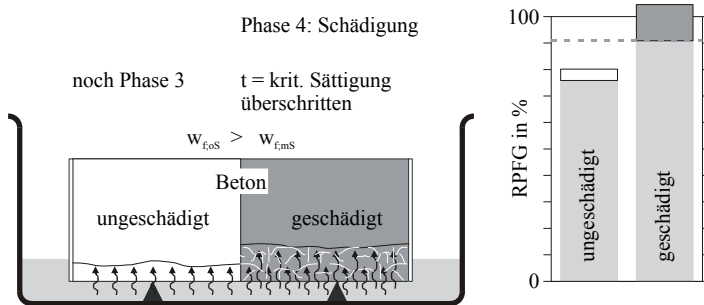


Bild 6-4: Vergleich der geschädigten und ungeschädigten Betone am Ende der Phase 4

Bei den in Bild 6-4 dargestellten Betonen mit hohem Frostwiderstand wird die kritische Sättigung während der Prüfung nicht erreicht. Phase 4 tritt somit nicht ein.

6.2 Vorschlag zur verkürzten Prüfung des Frostwiderstands dichter hochfester Betone

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die infolge der Frostbeanspruchung eingetretenen Gefügeschädigungen der silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ durch ein Überschreiten der von Fagerlund [Fag 97] definierten kritischen Sättigung hervorgerufen wurden. Daher kann auf Basis des zuvor dargestellten qualitativen Modells zur Beschreibung des Frostwiderstands bei der Laborprüfung eine evtl. eintretende Gefügeschädigung innerhalb der Laborprüfung an Hand des relativen Porenfüllungsgrades vorhergesagt werden.

In Phase 3 des Modells ist die zusätzliche Wasseraufnahme durch die „Frostpumpe“ [Set 99] während eines Frost-Tau-Wechsels bezogen auf die Gesamtporosität für alle Betone annähernd gleich hoch. Deshalb kann auf eine Berücksichtigung dieses Anteils zur Beurteilung des Frostwiderstands verzichtet werden.

Dagegen stellt sich in Abhängigkeit von der Zusammensetzung und der Lagerung ein für diesen Beton charakteristischer relativer Porenfüllungsgrad ein (Phase 1). Außerdem hängt die kapillare Wasseraufnahme während Phase 2 von der Kontinuität der Kapillarporen ab. Deshalb ist der Zuwachs des relativen Porenfüllungsgrades insbesondere bei $(w/z)_{eq} > 0,40$ unterschiedlich für den jeweiligen Beton. Die Wassergehalte während Phase 1 und 2 müssen daher bei der Beurteilung des Frostwiderstands hochfester Betone berücksichtigt werden.

Der relative Porenfüllungsgrad nach dem kapillaren Saugen ist für Betone, bei denen es während der Prüfung zu einem Abfall des relativen dynamischen E-Moduls kommt, deutlich höher als bei ungeschädigten Betonen. Er korreliert gut mit der Änderung des relativen dynamischen E-Moduls nach 100 Frost-Tau-Wechseln (Bild 5-44). Daraus resultiert der Vorschlag, den Frostwiderstand dichter hochfester Betone an Hand des relativen Porenfüllungsgrades am Ende der Phase 2, also nach dem kapillaren Saugen zu prüfen. Das Gefüge der dichten hochfesten Betone wurde während der Prüfung mit dem CIF-Verfahren mit bis zu 100 Frost-Tau-Wechseln geschädigt bzw. zerstört, wenn der relative Porenfüllungsgrad nach dem kapillaren Saugen einen Wert von 75 % überstieg.

6.3 Validation mit zusätzlichen Untersuchungen

6.3.1 Frisch- und Festbetonparameter

Die an den dichten hochfesten Betonen mit Portlandzement gewonnenen Erkenntnisse wurden mit zusätzlichen Untersuchungen zum Frostwiderstand und zur Sättigung des Porengefüges an dichten hochfesten Betonen mit verschiedenen Zementarten (siehe Abschnitt 4.1.1) validiert. Die Betone entsprachen den Zusammensetzungen oS35 bzw. mS35 (Abschnitt 4.2.1 und Tafel 4-1). Die Frischbetoneigenschaften wurden bereits in Abschnitt 5.1 und die Festigkeitseigenschaften in Abschnitt 5.2 dargestellt. Die Kennwerte lagen in der Größenordnung der vergleichbaren Betone mit Portlandzement. Lediglich die Festigkeit der Betone mit dem CEM III/B 42,5 N war nach 28 Tagen um ca. 10 N/mm² geringer als die der übrigen Betone mit einem $(w/z)_{eq}$ von 0,35.

6.3.2 Frostwiderstand

Der Frostwiderstand der zusätzlich untersuchten Betone mit verschiedenen Zementen wurde mit dem CIF-Verfahren [Set 98] untersucht. Neben dem relativen dynamischen E-Modul (RDM) wurden die Abwitterung, die 7-tägige kapillare Wasseraufnahme (w_{cap}) sowie die Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel (w_f) für die einzelnen Betone bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tafel A-6 bis Tafel A-8 enthalten.

Die Abwitterung und die kapillare Wasseraufnahme der zusätzlich untersuchten Betone waren ähnlich gering wie die der vergleichbaren Portlandzementbetone ohne und mit Silikastaub. Bild 6-5 zeigt die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel. Links sind die Ergebnisse der Betone ohne Silikastaub und rechts die der silikastaubhaltigen Betone dargestellt. Bei den Betonen ohne Silikastaub

veränderte sich vergleichbar zu den Portlandzementbetonen ohne Silikastaub mit verschiedenen äquivalenten Wasserzementwerten der relative dynamische E-Modul auch nach 100 Frost-Tau-Wechseln fast nicht.

Im Gegensatz dazu nahm bei einem $(w/z)_{eq}$ von 0,35 der relative dynamische E-Modul der silikastaubhaltigen Betone mit zunehmendem Klinkergehalt des Zements ab (Bild 6-5). Auch nach 100 Frost-Tau-Wechseln war kein Abfall des relativen dynamischen E-Moduls bei den silikastaubhaltigen Betonen mit Hochofenzement nahezu unverändert. Dagegen fiel er nach 100 Frost-Tau-Wechseln bei dem silikastaubhaltigen Beton mit Portlandhüttenzement auf einen Wert von ca. 82 % und bei dem mit Portlandkalksteinzement auf einen Wert von rd. 70 % ab. Das Gefüge des silikastaubhaltigen Betons mit Portlandzement war, wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben, schon nach 56 Frost-Tau-Wechseln zerstört.

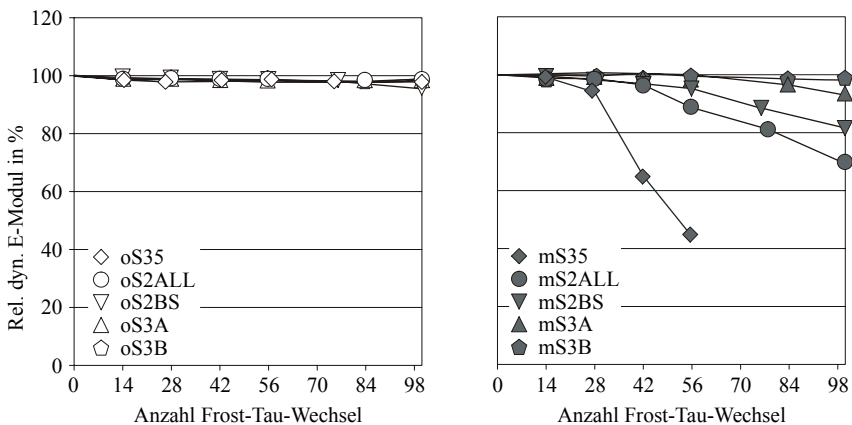


Bild 6-5: Relativer dynamischer E-Modul der Betone mit verschiedenen Zementen in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (CIF-Verfahren): links Betone ohne Silikastaub; rechts Betone mit 8 M.-% Silikastaub

Die Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel ist in Bild 6-6 in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel dargestellt. Der beginnende Abfall des relativen dynamischen E-Moduls der silikastaubhaltigen Betone war ebenfalls durch eine erhöhte Wasseraufnahme gekennzeichnet. Diese fiel im Vergleich zu dem Beton mS35 geringer aus, da der relative dynamische E-Modul nicht so stark abgefallen war.

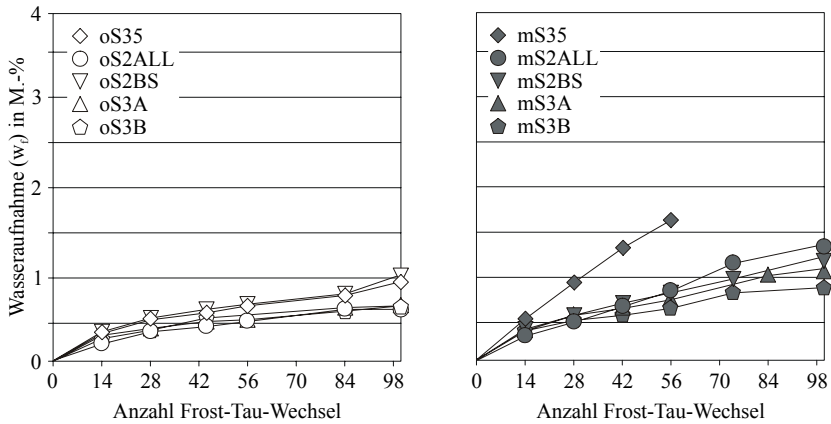


Bild 6-6: Wasseraufnahme der Betone mit verschiedenen Zementen in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (CIF-Verfahren): links Betone ohne Silikastaub; rechts Betone mit 8 M.-% Silikastaub

Die durch die „Frostpumpe“ verursachte Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel war für die Betone mit Silikastaub annähernd so groß wie für die vergleichbaren Betone ohne Silikastaub, sofern das Gefüge der Betone noch nicht geschädigt war.

6.3.3 Relativer Porenfüllungsgrad

Die an den Betonen mit den verschiedenen Zementarten durchgeführten Untersuchungen bestätigen das in Abschnitt 6.1 erläuterte qualitative Modell zur Beschreibung des Frostwiderstands hochfester Betone. Die Zusammenhänge können aus Bild 6-7 abgeleitet werden. Es ist der relative Porenfüllungsgrad für die verschiedenen Betone zu verschiedenen Zeitpunkten aufgetragen. Die Ergebnisse enthält Tafel A-18.

Während Phase 1 stellt sich ein für die Betonzusammensetzung charakteristischer relativer Porenfüllungsgrad ein. Der relative Porenfüllungsgrad der Betone ohne Silikastaub war im Alter von 28 Tagen mit rd. 60 % vergleichbar zu dem des Betons oS35. Auf Grund der Reaktion des Silikastaubs erhöhte sich der relative Porenfüllungsgrad deutlich. Für den Beton mit Portlandkalksteinzement betrug er im Alter von 28 Tagen rd. 75 % und war damit vergleichbar mit dem silikastaubhaltigen Beton mS35. Enthielt der verwendete Zement Hüttensand, nahm der Porenfüllungsgrad im Alter von 28 Tagen mit steigendem Hüttensandgehalt ab (gestreifte Balken in Bild 6-7).

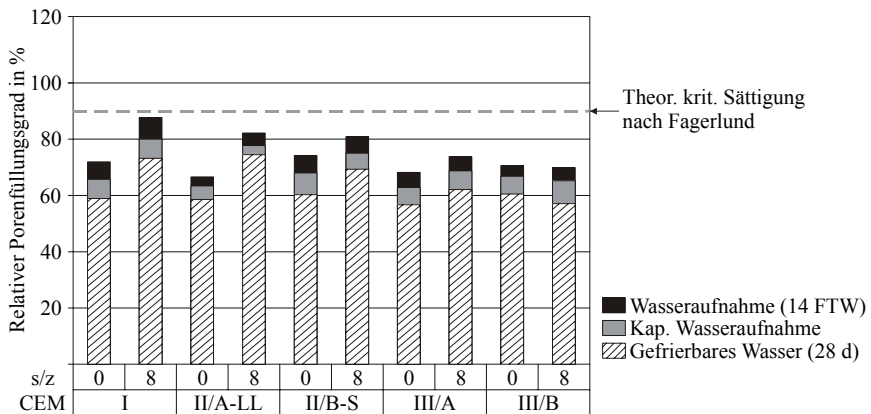


Bild 6-7: Relativer Porenfüllungsgrad (RPFG) der Betone mit unterschiedlichen Zementen nach 28 Tagen, 7 Tagen kapillaren Saugen und 14 Frost-Tau-Wechseln

In Phase 2, der Wiederbefeuchtung, nahmen die silikastaubhaltigen Betone ungefähr gleich viel Wasser kapillar auf wie die Betone ohne Silikastaub. Das Kapillarporengefüge wurde durch den Einsatz von Silikastaub nur geringfügig verringert, so dass sich der relative Porenfüllungsgrad für Betone mit Silikastaub um annähernd den gleichen Betrag wie für die entsprechenden Betone ohne Silikastaub erhöhte (graue Balken in Bild 6-7).

Die Wasseraufnahme während der ersten Frost-Tau-Wechsel (Phase 3) war bei den silikastaubhaltigen Betonen ähnlich der der vergleichbaren Betone ohne Silikastaub, solange der relative dynamische E-Modul annähernd unverändert blieb. Deshalb fiel die Zunahme des relativen Porenfüllungsgrades für die ersten 14 Frost-Tau-Wechsel für die Betone ohne und mit Silikastaub ungefähr gleich aus (schwarze Balken in Bild 6-7).

Bild 6-8 veranschaulicht, dass die zusätzlichen Untersuchungen den Zusammenhang zwischen dem relativen Porenfüllungsgrad nach dem kapillaren Saugen und der Änderung des relativen dynamischen E-Moduls am Ende des CIF-Tests bestätigen. Unabhängig von der Zementart, vom Silikastaubeinsatz und vom äquivalenten Wasserzementwert fiel der relative dynamische E-Modul dichter hochfester Betone während der Prüfung mit dem CIF-Verfahren deutlich ab, wenn der relative Porenfüllungsgrad nach dem kapillaren Saugen im Alter von 35 Tagen (Ende Phase 2) einen Wert von 75 % überstieg.

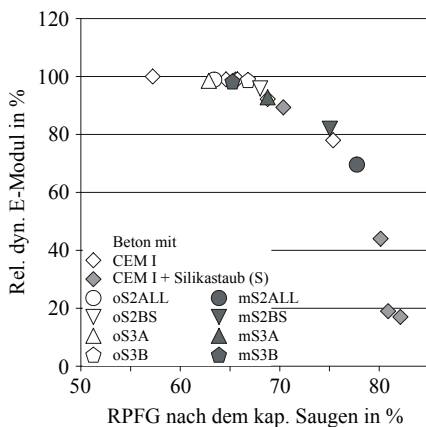


Bild 6-8: Zusammenhang zwischen relativem dynamischen E-Modul und dem relativen Porenfüllungsgrad nach dem kapillaren Saugen der Betone mit unterschiedlichen Zementen

7 Zusammenfassung

Betonbauwerke müssen während ihrer Nutzungsdauer einen ausreichenden Widerstand gegenüber Umwelteinwirkungen aufweisen. Je nach Exposition, der das Bauwerk oder Bauteil ausgesetzt ist, gehört hierzu ein adäquater Frostwiderstand. Die in den gültigen Regelwerken getroffenen Anforderungen beruhen auf langjährigen Erfahrungen mit normalfestem Beton. Mit hochfestem Beton, der wiederholten Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt ist, liegen deutlich weniger praktische Erfahrungen vor. Jedoch wird auf Grund der Zusammensetzung ein dem normalfesten Beton vergleichbares, auf keinen Fall schlechteres Verhalten vorausgesetzt.

Anlass für die durchgeführten Untersuchungen waren teilweise widersprüchliche Ergebnisse bei neueren Laboruntersuchungen zum Frostwiderstand hochfester Betone ohne künstlich eingeführte Luftporen. Insbesondere wurden innere Gefügeschäden bei der Laborprüfung aber auch im baupraktischen Verhalten hochfester Betone mit Silikastaub festgestellt. Die Ursachen für das beobachtete Materialverhalten konnten nicht abschließend geklärt werden.

Ziel dieser Arbeit war es, den Frostwiderstand dichter hochfester Betone besser beschreiben zukönnen. Dabei lag der Schwerpunkt der Arbeit darauf, die Ursachen der in der Literatur beschriebenen Unterschiede hinsichtlich des Frostwiderstands von Betonen ohne und mit Silikastaub herauszuarbeiten. Insbesondere wurden dazu folgende Fragestellungen bearbeitet:

1. Welche Korrelation bestehen zwischen Festigkeits- oder Verformungskenngrößen und dem Abfall des relativen dynamischen E-Moduls infolge einer Frostbeanspruchung?
2. In welchen Bereichen der Betonmatrix kommt es während einer Frostbeanspruchung zu einer inneren Gefügeschädigung und welchen Verlauf nimmt sie?
3. In welcher Weise besteht ein Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen Struktur, Feuchtigkeitshaushalt und Sättigung des Porensystems und dem Frostwiderstand der hochfesten Betone?
4. Welchen Einfluss nehmen die bei der puzzolanischen Reaktion des Silikastaubs gebildeten Reaktionsprodukte auf den Frostwiderstand silikastaubhaltiger hochfester Betone?

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ❑ Die Untersuchungen für hochfeste Betone mit $(w/z)_{eq} < 0,35$ zeigten, dass diese einen ausreichenden Frostwiderstand haben. Damit bestätigte sich das in der Literatur beschriebene Verhalten. Betone mit Silikastaub und $(w/z)_{eq} < 0,35$ und alle Betone ohne Silikastaub weisen nach 100 Frost-Tau-Wechseln bei der Prüfung sowohl mit dem CIF-Verfahren als auch mit dem Balkenverfahren nur geringe Änderungen des relativen dynamischen E-Moduls auf. Dagegen fällt der relative dynamische E-Modul der silikastaubhaltigen Betone mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ z. T. schon nach wenigen Frost-Tau-Wechseln deutlich ab.
- ❑ Die innere Gefügeschädigung der hochfesten Betone infolge eines Frostangriffs wird gut durch die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls charakterisiert. Die visuelle Begutachtung des Gefüges nach der Frostbeanspruchung bestätigt, dass ein relativer dynamischer E-Modul von 80 % den Beginn einer deutlichen Gefügeschädigung beschreibt. Das Gefüge ist bei einem relativen dynamischen E-Modul von 60 % stark geschädigt.

Andere Festbetoneigenschaften, wie Festigkeit (Spaltzug- bzw. Biegezugfestigkeit), statischer E-Modul oder Porosität korrelieren mit der Änderung des relativen dynamischen E-Moduls infolge der Frostbeanspruchung. Jedoch fällt die Festigkeit bis zu einem bestimmten Wert ab, ohne dass ein Abfall des relativen dynamischen E-Moduls auftritt. Eine Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die Baupraxis ist jedoch zur Zeit nicht gegeben.

- ❑ Die visuelle Auswertung von Dünnschliffen und die kapillare Wasseraufnahme der verschiedenen Betone belegen, dass sich durch den Einsatz von Silikastaub im Gefüge hochfester Betone nicht vermehrt Mikrorisse während der Erhärtung ausbilden. Eine frühe Mikrorissbildung ist somit

nicht Ursache für die Gefügeschädigung bei den silikastaubhaltigen Betonen infolge der Frostbeanspruchung.

- ❑ Die Gesamtporosität, bestimmt als Wasseraufnahme bei 15 MPa, hängt im Alter von 28 Tagen unmittelbar vom Wasserzementwert ab. Der Einsatz von Silikastaub hat auf die Gesamtporosität keinen Einfluss. Dagegen wird die Porenradienverteilung signifikant beeinflusst. Während sich der Anteil an Kapillarporen verringert, nimmt der Anteil an Gelporen, insbesondere der $< 0,004 \mu\text{m}$ stark zu.

Die Ausbildung eines kapillarporenen Gefüges ist für einen hohen Frostwiderstand dichter Betone notwendig. Jedoch weisen alle untersuchten hochfesten Betone ein solches Gefüge auf. Die frostbedingten Gefügeschädigung bei den silikastaubhaltigen Betonen können an Hand der bestimmten Unterschiede in der Porosität, Porengrößenverteilung bzw. in den Gefügekenngrößen infolge des Silikastaubeinsatzes nicht erklärt werden.

- ❑ Während der Erhärtung der Mörtel und Betone enthalten, unabhängig von der Lagerungsart (nass oder trocken), silikastaubhaltige Zusammensetzungen mehr physikalisch gebundenes Wasser als vergleichbare Zusammensetzungen ohne Silikastaub. Ursache hierfür ist die Bildung wasserreicher Alkalisilikate.
- ❑ Zwischen Kernbeton und einer Randzone von ca. 20 mm bildet sich bei der Klimaraumlagerung bei 20°C und 65 % rel. F. ein Feuchtigkeitsgradient aus, da Wasser von den Oberflächen verdunsten kann. Im Beton ohne Silikastaub ist schon nach einem Tag kapillarem Saugen kein Unterschied in der Feuchtigkeit zwischen Kern und Randbereich zu erkennen. Hingegen übersteigt in dem silikastaubhaltigen Beton zu diesem Zeitpunkt die Feuchtigkeit im Randbereich die des Kerns. Bei beiden Betonarten ändert sich die Feuchtigkeitsverteilung während des weiteren kapillaren Saugens nicht mehr.
- ❑ Nach ca. 28 Frost-Tau-Wechseln findet in dem silikastaubhaltigen Beton (mS35) ebenfalls ein Ausgleich zwischen Kern- und Randfeuchte statt. Zudem steigt die Wasseraufnahme signifikant an. Dieses Verhalten korreliert gut mit dem beginnenden Abfall des relativen dynamischen E-Moduls und dem Einsetzen der inneren Gefügeschädigung.
- ❑ Der relative Porenfüllungsgrad (RPF) im Alter von 28 Tagen beträgt bei den Betonen ohne Silikastaub und bei den silikastaubhaltigen Betonen mit $(w/z)_{\text{eq}} < 0,35$ ca. 60 %. Im Gegensatz dazu sind bei den silikastaubhaltigen Betonen mit $(w/z)_{\text{eq}} \geq 0,35$ annähernd 73 % der Poren mit potentiell

gefrierbarem Wasser gefüllt. Bei einem relativen dynamischen E-Modul von ca. 80 % liegt der RPFPG in jedem Fall bei ca. 90 %. Eine (zumindest lokale) Überschreitung der von Fagerlund definierten „kritischen Sättigung“ führt zu den beobachteten Gefügeschäden.

Der RPFPG nach dem kapillaren Saugen korreliert gut mit der Änderung des relativen dynamischen E-Moduls nach Beendigung des CIF-Versuchs. Sind nach dem kapillaren Saugen weniger als 75 % der Poren gefüllt, bleibt das Gefüge der Betone ungeschädigt. Übersteigt der RPFPG einen Wert von 75 % fällt der relative dynamische E-Modul während der Prüfung ab.

- ❑ Mit Hilfe der NMR-Spektroskopie und der STA wurde gezeigt, dass bei der puzzolanischen Reaktion des Silikastaubs kein zusätzliches Wasser chemisch in die Reaktionsprodukte eingebunden wird. Beträchtliche Anteile des Silikastaubs verbleiben trotz der hohen puzzolanischen Reaktivität auch nach 28tägiger Lagerung unregiert.
- ❑ Die Reaktionsprodukte des reagierten Anteils an Silikastaub weisen C/S-Verhältnisse von 0,5 bis 0,6 auf. Da CSH-Phasen erst ab einem C/S-Verhältnis von ca. 0,9 thermodynamisch stabil sind, ist davon auszugehen, dass sich neben stabilen CSH-Phasen auch hygroskopisch wirkende Alkalisilikate bilden.
- ❑ Der Wasseranteil in den Alkalisilikaten ist gefrierbar. Der physikalisch an den Alkalisilikaten gebundene Wasseranteil steigt mit zunehmendem äquivalenten Wasserzementwert.
- ❑ Aus der ganzheitlichen Betrachtung der Ergebnisse konnte ein qualitatives 4 Phasen-Modell zur Beschreibung des Frostwiderstands dichter hochfester Betone abgeleitet werden. Phase 1 beschreibt den Feuchtigkeitsgehalt und die Porenfüllung während der Erhärtung. In den Phasen zwei und drei werden die Zustände während der Wiederbefeuchtung – der kapillaren Wasseraufnahme – und der Wassermigration im Gefüge sowie der zusätzlichen Wasseraufnahme durch die „Frostpumpe“ während der ersten Frost-Tau-Wechsel charakterisiert. Die vierte Phase umfasst die Schädigung, die eintritt, wenn die von Fagerlund definierte „kritische Sättigung“ erreicht wurde.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit kann geschlussfolgert werden, dass hochfester Beton mit Silikastaub und einem äquivalenten Wasserzementwert $\geq 0,35$ mit künstlich eingeführten Luftporen hergestellt werden sollte, wenn er während der Nutzung entsprechend der Expositionsklasse XF3 nach DIN EN 206-1 einem Frostangriff mit hoher Wassersättigung ausgesetzt ist.

8 Literaturverzeichnis

- Alf 89 Alfes, C.: Hochfeste, verformungsarme Betone mit Silica-Staub.
In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 55 (1989), Nr. 11, S. 62-71
- Alo 02 Alonso, M.-T.: Hochfester Beton.
In: Beton 52 (2002), Nr. 11, S. 563-567 und 52 (2002), Nr. 12, S. 621-624
- Alt 89 Altner, W.; Schmidt, D.; Ettel, W.-P.: Einsatzmöglichkeiten von amorphen Siliziumdioxid-Stäuben im Zementbeton.
In: Betontechnik (1989), S. 117-119
- Alt 90 Altner, W.; Richter, T.: Stofflich-technologische Grundlagen und Anwendung hochfester Betone.
In: Bauforschung-Baupraxis (1990), Nr. 259, S. 5-29
- Aub 97 Auberg, R.; Setzer, M.J.: Frostwiderstand von Betonen mit unterschiedlichen Zementen.
In: Hrsg.: Bauhaus-Universität Weimar: 13. Internationale Baustofftagung, ibausil : 24.-26.09.1997 in Weimar ; Vol. 1. Weimar, S. 1.0017-1.0027
- Aub 98 Auberg, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test.
In: Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften der Universität Gesamthochschule Essen (1999), Nr. 6
- Bag 86 Bager, D.H., Sellevold, E.J.: Ice formation in hardened cement past, Part 1 – Room temperature cured pastes with variable moisture contents.
In Cement and Concrete Research Vol. 16 (1986), Nr. 5, S. 706-720
- Bar 80 Barer, S.S.; Derjaaguin, B.V.; Churaev, N.V.; Kiseleva, O.A.; Sobolev, V.D.: Viscosity of nonfreezing thin interlayers between the surfaces of ice and quartz.
In: Journal of Colloidal Interface Science 74 (1980), Nr. 173
- Bau 29 Bauer E.E.: High early strength concrete.
In: Proceedings of the American Concrete Institute 28 (1929), S. 314-328
- Bea 79 Beaudoin, J.J.; Mac Innis, C.: The mechanism of frost damage in hardened cement paste.
In: Cement and Concrete Research 9 (1979), Nr. 4, S. 139-147
- Bed 90 Beddoe, R.E.; Setzer, M.J.: Phase transformation of water in hardened cement paste. A low-temperature DSC investigation.

- In Cement and Concrete Research 20 (1990), Nr. 2, S. 236-242
- Bee 89 Beedle, S.S; Groves, G.W.; Rodger, S.A.: The effect of fine pozzolanic and other particles on the hydration of C3S.
In: Advances of Cement Research 2 (1989), Nr. 5, S. 3-8
- Ben 88 Bentur, A.: The role of the interface in controlling the performance of high quality cement composites.
In: Gardner, E. (Ed.): Advances in Cement Manufacture and Use : July 31 - August 5, 1988, Trout Lodge, Potosi, Missouri. New York, NY: Engineering Foundation, 1989, S. 227-237
- Ber 03 Berger, F.: Festkörper-NMR-Studien zur Charakterisierung neuer Si-(B)-C-N-Keramiken auf der Basis von Polysilazanen und Poly(silylencarbodiimiden) : Dissertation. Stuttgart, 2003
http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2003/1533/pdf/gesamt_prom_1.pdf (Download: 14.04.2005)
- Bit 85 Biterli, K.; Yang, Q. W.; Peter, G.: Zusammenhänge zwischen Betonporosität und Frostbeständigkeit.
In: Schweizer Ingenieur und Architekt (1985), Nr. 25, S. 628-636
- Bre 02 Breit, W.: Säurewiderstand von Beton.
In: Beton 52 (2002), Nr. 10, S. 505-510
- Bre 93 Breit, W.; Raupach, M.: Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone mit Multi-Ring-Elektroden.
In: ibac Kurzberichte 6 (1993), Nr. 41
- Bro 97 Brough, A. R.; Dobson, C. M.; Richardson, I., G.; Groves, G. W.: 29Si Enrichment and Selective Enrichment for Study of the Hydration of Model Cements and Blended Cements.
In: Justnes, H. (Ed.): Proceedings of the 10th Int. Congress on the Chemistry of Cement: Vol. 3: Additives Admixtures Characterisation Technique. Göteborg: Amarkai AN and Congrex, 1997, S. 3v001
- Bru 77 Brun, M.; Lallemand, A.; Quinson, J.F.; Eyraud, C.: A new method for the simultaneous determination of the size and shape of pores.
In: Thermochimica Acta 21 (1977), Nr. 1, S. 59-88
- Büc 96 Büchler, D.: Der elektrische Widerstand von zementösen Werkstoffen – Modell, Einflussgrößen und Bedeutung für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton. Dissertation, Diss. ETH Nr. 11876, Zürich, 1996,
- Bun 91 Bunke, N.: Prüfung von Beton : Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048.
In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (1991), Nr. 422

- Büs 05 Büsing, F.W.; Schumann, C.: Der Portland-Cement und seine Anwendung. Berlin: Kommissions-Verlag der deutschen Bauzeitung GmbH, 1905
- Byf 85 Byfors, K.: Carbonation of concrete with silica fume and fly ash. In: Nordic Concrete Research (1985), Nr. 4, S. 26-36
- Cla 84 Clayden, N. J. ; Dobson, C. M.; Groves, G. W.; Hayes, C. J.; Rodger, S. A.: Solid State NMR Studies of Cement Hydration. In: Proceedings of the British Ceramic Society 35 (1984), S. 55-64
- Cog 03 o. V.: Wasserglas – altbekannt: Anorganischer Kleber und Bindemittel. unveröffentlicht
- Con 98 Cong, X.; Kirkpatrick, R.J.; Yarger, J.L.; McMillan, P.F.: The Structure of Calcium Silicate Hydrate: NMR and Raman Spectroscopic Results. In: Colombet, P. et al: Resonance Spectroscopy of Cement-Based Materials. Berlin (u.a.) : Springer, 1998, S. 143-158
- Coo 99 Cook, R.A.; Hover, K.C.: Mercury porosimetry of hardened cement pastes. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), Nr. 6, S. 933-943
- Der 81 Derjaguin, B.V.; Churaev, N.V.; Sobolev, V.D.; Barer, S.S.: Thermocrystallisation of nonfreezing water films on the surface of capillaries. In: Journal of Colloidal Interface Science 84 (1981), S. 182
- Det 89 Detwiler, R.J.; Dalgleish, B.J.; Williamson, R.B.: Assessing the durability of concrete in freezing and thawing. In: ACI Materials Journal 86 (1989), S. 29-35
- Dob 88 Dobson, C. M.; Golderhan, D. G. C.; Ramsay, J. D. F.; Rodger, S. A.: ^{29}Si MAS NMR study of the hydration of tricalcium silicate in the presence of finely divided silica. In: Journal of Materials Science 23 (1988), S. 4108-4114
- Ebr 03 Ebrecht, E.: NMR-Untersuchungen zur Medium Range Order in binären Alkalisilicatgläsern : Dissertation. Freiberg, 2003
<https://fridolin.tu-freiberg.de/archiv/pdf/ChemieEbrechtEila122194.pdf> (Download: 14.04.2005)
- Fag 77 Fagerlund, G.: The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete : RILEM recommendation. In: Materials and Structure 58 (1977), Nr. 10, S. 217-229
- Fag 97 Fagerlund, G.: Internal frost attack : State of the art. In: M.J. Setzer and R. Auberg (eds.): Frost resistance of concrete. London (u.a.): E&FN Spon, 1997, S. 321-338

- Fel 04 Feldrappe, V.; Müller, Ch.: Influence of silica fume on freeze-thaw resistance of high strength concrete.
In: Proceedings of international conference on durability of high-performance concrete and final workshop of CONlife. Freiburg : Aedificatio, 2004, S. 255-265
- Fel 04a Feldrappe, V.; Müller, Ch.: Auswirkungen einer Frostbeanspruchung auf dichte hochfeste Betone.
In: Beton 54 (2004), Nr. 10, S. 513-515 und 54 (2004), Nr. 11, S. 575-579
- Fel 86 Feldmann, R. F.: Dependence of the durability of mortars on sand/cement ratio and micro-silica (Silica Fume) addition.
In: Durability of Building Materials (1986), Nr. 4, S. 137-149
- Fio 89 Fiorato, T.E.: PCA Research on High Strength Concrete.
In: Concrete International 19 (1989), Nr. 44, S. 44-50
- Foy 88 Foy, C.; Pigeon, M.; Banthia, N.: Freeze-thaw durability and deicer salt scaling resistance of a 0,25 water-cement ratio concrete.
In: Cement and Concrete Research 18 (1988), Nr. 4, S. 604-614
- Fri 92 Friebolin, H.: Ein- und zweidimensionale NMR-Spektroskopie – Eine Einführung. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 2. Auflage, 1992
- Gag 91 Gagné, R. ; Pigeon, M. ; Aitcin, P. : Durabilité au gel des bétons de hautes performances mécaniques.
In: Materials and Structures 23 (1991), Nr. 134, S. 103-109
- Gat 98 Gatty, L.; Bonnamy, S; Feylessoufi, A.; Van Damme, H.: Silica Fume Distribution and Reactivity in Reactive Powder Concretes.
In: Malhotra, V.M. (Ed.): 6th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Bangkok. Farmington Hills, MI: ACI, 1998, S. 931-952
- Gla 84 Glasser, F.P.; Marr, J.: The effect of mineral additives on the composition of cement pore fluids.
In: British Ceramic Proceedings 35 (1984), S. 419-429
- Gol 89 Goldmann, A.; Bentur, A.: Bond Effects in High Strength Silica-Fume concretes.
In: ACI Materials Journal 86 (1989), S. 440-447
- Gro 89 Groves, G.W.; Rodger, S.A.: The hydration of C3S and ordinary Portland cement with relatively large additions of microsilica.
In: Advances in Cement Research 2 (1989), S. 135-140
- Grü 81 Grübl, P.: Über die Rolle des Eises im Gefüge zementgebundener Baustoffe.
In: Beton 31 (1981), Nr. 2, S. 54-58

- Gru 82 Grutzeck, M.W.; Roy, D.M.; Wolfe-Confer, D.: Mechanism of Hydration of Portland Cement Composites containing Ferrosilicon Dust. In: Gouda, G.R. (Ed.): Proceedings of the 4th International Conference on Cement Microscopy. Duncanville, Tex.: International Cement Microscopy Association, 1982, S. 193-202
- Gru 83 Grutzeck, M.W.; Atkinson, S.; Roy, D.M.: Mechanism of Hydration of Condensed Silica Fume in Calcium Hydroxid Solutions. In: 1st CANMET/ACI International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral by-Products in Concrete. Malhotra, V.M. (Ed.). Farmington Hills, MI : ACI, 1983, S. 643-664
- Gus 94 Guse, U.; Hilsdorf, H. K.: Zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand hochfester Betone. In: Wissenschaftliche Zeitschrift Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar 40 (1994), Nr. 5/6/7, S. 159-164
- Gus 98 Guse, Ulf ; Hilsdorf, Hubert K.: Dauerhaftigkeit hochfester Betone. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (1998), Nr. 487
- Hal 95 Halamickova, P.; Detwiler, R.J.: Water Permeability and Chloride Ion Diffusion in Portland Cement Mortars: Relationship to Sand Content and Critical Pore Diameter. In: Cement and Concrete Research 25 (1995), Nr. 4, S. 790-802
- Ham 91 Hammer, T. A.; Sellevold, E. J.: Frost Resistance of high strength concrete. In: High-Strength Concrete. Hester, W. T. (Ed.). Destroit, Mi.: ACI, 1991, S. 457-488
- Här 93 Härdtl, R.; Schiebl, P.: Verwendung von künstlichen Puzzolanen als Zusatzstoff im Beton : Phase 1: Grundsätze der Wirksamkeit ; Teil A: Steinkohlenflugasche ; Sachstandsbericht. Aachen: ibac, 1993
- Här 95 Härdtl, R.: Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (1995), Nr. 448
- Hei 03 Heine, P.; Setzer, M.J.: Praxiskonforme Prüfung des Frostwiderstands von Gesteinskörnungen im Beton. In: Beiträge zum 43. Forschungskolloquium am 09. und 10. Oktober 2003 an der Ruhr-Universität Bochum. Bochum, 2003, S. 177-186
- Hei 99 Heinrich, U.; Seyfarth, K.; Stark, J.: Dauerhaftigkeit von Hochleistungsbeton. In: Beiträge zum 37. Forschungskolloquium am 07. und 08. Oktober 1999 an der Bauhaus-Universität Weimar. Weimar, 1999, S. 145-155

- Hel 90 Federation Internationale de la Precontrainte, FIP ; Comité Euro-International du Béton, CEB (Hrsg.): High Strength Concrete : State of the Art Report.. Lousanne, 1990
- Hel 92 Held, M.; König, G.: Hochfester Beton bis B125 : Ein geeigneter Baustoff für hochbelastete Druckglieder.
In: Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992), Nr. 2, S. 41-45 und 87 (1992), Nr. 3, S. 74-76
- Hel 92a Helmuth, R.; Stark, D.: Alkali-Silica Reactivity Mechanisms.
In: Materials Science of Concrete (1992), S. 131-208
- Hen 75 Henning, O.: Silikatische Systeme. Leipzig : Institut für Aus- und Weiterbildung, 1975
- Hjo 88 Hjorth, J.; Skibsted, J.; Jakobsen, J.: ²⁹Si MAS NMR Studies of Portland Cement Components and Effects of Microsilica on the Hydration Reaction.
In: Cement and Concrete Research 18 (1988), S. 789-798
- Hol 04 Holt, E.; Gay, M. (Ed.): Recommendations for Application of High-Performance Concrete. ohne Ort und Jahr + Beilagen: 1 CD-Rom
Verteilt bei: International conference on durability of high-performance concrete and final workshop of CONlife. 23 - 24.09.2004
- Hoo 93 Hooton, R.D.: Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attack, Freezing and Thawing and Alkali-Silica Reactivity.
In: ACI-Materials Journal 90 (1993), Nr. 2, S. 143-151
- Hua 85 Huang Ch.; Feldman R.F.: Influence of Silica Fume on the Microstructural Development in Cement Mortars.
In: Cement and Concrete Research 15 (1985), Nr. 2, S. 285-294
- Hub 93 Huber, H.: Hochleistungsbeton : Internationaler Stand und Folgerungen.
In: Zement und Beton (1993), Nr. 3, S. 2-4
- Hüt 00 Hüttl, R.; Hillemeier, B.: Hochleistungsbeton : Beispiel Säureresistenz.
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 66 (2000) Nr. 1, S. 52-60
- Jac 95 Jacobsen, S.; Gran, H. C.; Sellevold, E. J.; Bakke, J. A.: High strength concrete : Freeze thaw testing and cracking.
In: Cement and Concrete Research 25 (1995), Nr. 8, S. 1775-1780
- Jap 96 Japan Center: Taunustor 2 in Frankfurt/Main. Firmenbroschüre, 1996
http://www.taunustor.de/de/pdf/jcf_broschuere.pdf (Download: 29.03.05)

- Jus 98 Justnes, H.: Kinetics of Reaction in Cementitious Pastes Containing Silica Fume.
In: Colombet, P. et al: Resonance Spectroscopy of Cement-Based Materials. Berlin (u.a.): Springer, 1998, S. 245-268
- Kön 98 König, G.; Kützing, L.: Mit einem Fasercocail zur Duktilität von Druckgliedern aus Hochleistungsбетon
In: Bautechnik (1998), Nr. 2, S. 62-66
- Kön 99 König, R.; Wagner, J.P.: Mikrosilica. Darmstadt: Woermann GmbH & Co. KG, 1999
- Kuk 92 Kukko, H.: Frost effects on microstructure of high strength concrete, and methods for their analysis. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 1992
- Lam 93 Lamprecht, H.-O.: Opus Caementitium: Bautechnik der Römer. Düsseldorf: Beton-Verlag GmbH, 1983
- Li 85 Li, S.; Roy, D.M.; Kumar, A.: Quantitative Determination of Pozzolanas in hydrated Systems.
In: Cement and Concrete Research 15 (1985), S. 1079-1086
- Lit 72 Litvan, G. G.: Phase Transitions of Adsorbates : IV: Mechanism of Frost Action in Hardened Cement Paste
In: Journal of the American Ceramic Society 55 (1972), Nr. 1, S. 38-42
- Loc 00 Locher, F. W.: Zement : Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 2000
- Loc 76 Locher, F.W.: Die Festigkeit des Zements.
In: Betontechnische Berichte 17 (1976)
- Loc 89 Locher, D.; Odler, I.: Interaction phenomena in the combined hydration of clinker minerals.
In: Il cemento 86 (1989), Nr. 1, S. 25-36
- Loh 02 Lohaus; L. Petersen; L.: Einfluss der Frostschädigung auf Betoneigenschaften.
In: Beton 52 (2002), Nr. 12, S. 588-5593
- Lud 96 Ludwig, M.: Zur Rolle der Phasenumwandlungen bei der Frost- und Frost-Tausalz-Belastung von Beton : Dissertation. Weimar, 1996
- Maa 01 Maage, M.: The Effect of Silica Fume on Corrosion of Steel Reinforcement – A Review.
In: Malhotra, V.M. (Ed.): 7th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madras. Detroit, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 2001,

- Maa 92 Maage, M.; Berg, T. : Setting Time of Concrete Influenced by Silica Fume and Water Reducer at different Temperatures.
In: Malhotra, V.M. (Ed.): 4th CANMET / ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Detroit, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 1992, S. 451-464
- Mal 00 Malhotra, V.M.; Zhang, M.-H.; Read, P.H.; Ryell, J.: Long-Term Mechanical Properties and Durability Characteristics of High-Strength/High-Performance Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials under Outdoor Exposure Conditions.
In: ACI Materials Journal 97 (2000), Nr. 5, S. 518-525
- Mal 83 Malhotra, V.M. ; Carette, G.G. : Silica Fume Concrete : Properties, applications and limitations.
In: Concrete International 5 (1983), Nr. 5, S. 40-46
- Mal 87 Malhotra, V.M.; Painter, K. A.; Bilodeau, A.: Mechanical properties and freezing and thawing resistance of high strength concrete incorporating silica fume.
In: Cement, Concrete, and Aggregates 9 (1987), Nr. 2, S. 65-79
- Mal 87a Malhotra, V. M.; Ramachandran, V.S.; Feldman, R.F.; Aitcin, P.C.: Condensed silica fume in concrete. CRC Press, Boca Raton, FL, 1987
- Mar 85 Marsh, B. K.; Day R. L.; Bonner, D.G.: Pore Structure Characteristics Affecting the Performance of Cement Pastes Containing Fly Ash.
In: Cement and Concrete Research 15 (1985), Nr. 6, S. 1027-1038
- Mar 88 Marsh, B. K., Day, R. L.: Pozzolanic and cementitious reactions of fly ash in blended cement pastes.
In: Cement and Concrete Research 18 (1988), Nr. 2, S. 301-310
- Meh 82 Mehta, P.K.; Gjörv, O.E.: Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume.
In: Cement and Concrete Research 12 (1982), S. 587-595
- Mei 79 Meier, U.G.: Über das Gefrieren von Wasser in feinporösen Feststoffen.
In: Beton 29 (1979), Nr. 1, S. 24-27
- Men 96 Meng, B.; Schiebl, P.: The Reaction of Silica Fume at Early Ages.
In: Justnes, H. (Ed.): Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement : Vol. 3: Additives Admixtures Characterisation Technique. Göteborg: Amarkai AN and Congrex, 1997, S. 3ii105

- Nis 94 Nischer, P.: Hochleistungsbeton : Verarbeitbarkeit, Festigkeit, E-Modul; Widerstand gegen lösenden Angriff.
In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 60 (1994), Nr.3, S. 68-77
- Nya 85 Nyame, B.K.; Illston, J.M.: Capillary pore structure and permeability of hardened cement paste.
In: Proceedings of the 7th International Congress on Chemistry of Cement : Vol. 3: Communication. Paris: Edition Septima, 1980, S. VI-181-VI-185
- Oka 81 Okada, E.; Hisaka, K.; Kazama, Y.; Hattori, K.: Freeze-thaw resistance of superplasticized concrete's.
In: Development in the Use of Superplasticizers. Detroit, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 1981, S. 215-231
- Pag 83 Page, C.L.; Vennesland, O.: Pore Solution and Chloride Binding Capacity of Silica-Fume Cement Pastes.
In: Materials and Structures 16 (1983), Nr. 91, S. 19-25
- Pal 04 Palecki, S.; Setzer, M.,J.: Description of the damage Process of HPC due to frost attack. In: Proceedings of international conference on durability of high-performance concrete and final workshop of CONlife. Freiburg: Aedificatio Verlag, 2004, S. 231-244
- Pet 03 Petersson, P.E; Utgenannt, P.: New findings in the field of freeze/thaw and scaling resistance.
In: Hrsg.: Bauhaus-Universität Weimar: 15. Internationale Baustofftagung, ibausil: 24.-27.09.2003 in Weimar ; Vol. 2. Weimar, 2003, S. 755-777
- Pet 03a Petersen, L.: Einfluss baustofflicher Schädigungsprozesse auf das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen : Dissertation
In: Lohaus, L. (Ed.): Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 3, Hannover, 2003
- Pig 87 Pigeon, M.; Gagné, R.; Foy, C.: Critical air-void spacing factors for low water-cement ration concretes with and without silica fume.
In: Cement and Concrete Research 17 (1987), Nr. 6, S. 896-906
- Pig 91 Pigeon, M.; Gagné, R.; Aitcin, P.-C.: Freezing and Thawing Tests of High-Strength Concretes.
In: Cement and Concrete Research 21 (1991), Nr. 5, S. 844-852
- Pig 95 Pigeon, M.; Pleau, R. (eds.): Durability of concrete in cold climates. London: E&FN Spon, 1995
- Pow 45 Powers, T.C.: A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete.
In: ACI Journal 41 (1945), S. 245-272

- Pow 46 Powers, T.C.; Brownyard, T.L.: Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste.
In: Proceedings of the American Concrete Institute 43 (1946/1947), S. 101-132.
- Pow 53 Powers, T.C.; Helmuth, R.A.: Theory of volume changes in hardened Portland cement pastes during freezing.
In: Highway Research Board Proceedings 32 (1953), S. 285-297
- Rau 02 Raupach, M.; Wolff, L.: Dauerhaftigkeit neuer Hydrophobierungen auf Beton. RWTH Aachen: Institut für Bauforschung, 2002. - Kurzbericht Nr. F 677
http://www.bbr.bund.de/bauwesen/projekte_bauforschung/kurzberichte/berichtsnr2420_dauerhaftigkeit.pdf (Download: 18.08.2005)
- Reg 82 Regourd M.; Mortureux, B.; Aitcin, P.C. Pinsonneault, P.: Microstructure of Field Concretes Containing Silica Fume.
In: Gouda, G.R. (Ed.): Proceedings of the 4th International Conference on Cement Microscopy. Duncanville, Tex.: International Cement Microscopy Association, 1982, S. 249-260
- Rei 95 Reinhard, H.W.: Hochleistungsbeton.
In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 61 (1995), Nr. 1, S. 62-68
- Ric 04 Rickert, J.: Zum Einfluss von Langzeitverzögerern auf der Basis von Phosphorsäure auf die Hydratation einzelner Klinkerphasen, Portlandzementklinker und Portlandzemente. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 2004
- Ric 99 Richardson, I. G.: The nature of C-S-H in hardened cements.
In: Cement and Concrete Research 29 (1999), S. 1131-1147
- Ric 99a Richter, T.: Hochfester Beton : Hochleistungsbeton. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 1999
- Rie 93 Riesemeier, H.; Goebbels, J.; Illerhaus, B.; Onel, Y.; Reimers, P.: 3-D Mikrocomputer-tomograph für die Werkstoffentwicklung und Bauteilprüfung.
In: DGZfP Berichtsband 37, 1993, S. 280-287
- Rom 78 Romberg, H.: Zementsteinporen und Betoneigenschaften.
In: Beton-Informationen 18 (1978), Nr. 5, S. 50-55
- Rön 01 Rønning, T.F.: Freeze.thaw Resistance of Concrete Effect of: Curing Conditions, Moisture Exchange and Materials ; Dissertation. Norwegian Institute of Technology, 2001
- Roy 89 Roy, D.M.: Fly Ash and Silica Fume : Chemistry and Hydration.
In: Malhotra, V.M. (Ed.): 3rd CANMET/ACI International Conference on Fly Ash Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Con-

- crete; Trondheim. Detroit, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 1989, S. 117-138
- Rüb 94 Rübner, K.; Schmidt, C.: The Microstructure of High-strength mortars and concretes.
In: Fresenius Journal of Analytical Chemistry 349 (1994), S. 243-245
- Sar 87 Sarkar, S. L.; Atcin, P. C.: Dissolution rate of silica fume in very high strength concrete.
In: Cement and Concrete Research 17 (1987), S. 591-601
- Sch 04 Schäfer, E.: Einfluss der Reaktion verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins : Dissertation. Clausthal, 2004
<http://bibliothek.tu-clausthal.de/OPUS/volltexte/2004/34/> (Download: 29.03.2005)
- Sch 61 Schäfer, A.: Frostwiderstand und Porengefüge. Beziehungen und Prüfverfahren.
In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (1964), Nr. 167, S. 5-57
- Sch 93 Scherer, G. W.: Freezing Gels.
In: Journal of Non-Crystalline Solids 155 (1993), Nr. 1, S. 1-25
- Sch 94 Schrage, I.: Hochfester Beton : Sachstandsbericht ; Teil 1: Betontechnologie und Betoneigenschaften.
In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (1994), Nr. 438
- Sch 95 Schießl, P., Breit, W.: Feuchteverteilung in Betonrandzonen.
In: Bausanierung (1995), Nr. 2, S. 46-49
- Sch 98 Schröder, P.; Müller, C.; Schießl, P.: Hochleistungsbeton mit Steinkohlenflugasche.
In: DAfStb-Forschungskolloquium (1998), Nr. 36, S.140-149
- Scr 88 Scrivener, K.L., Bentur, A; Pratt, P.L.: Quantitative Characterisation of the Transition Zone in High Strength Concretes.
In: Advances in Cement Research 1 (1988), Nr. 4, S. 230-237
- Sel 82 Sellevold, E.J.; Bager, D.H.; Kitgaard, J.K.; Knudsen, T.: Silica Fume – Cement Pastes : Hydration and Pore Structure.
Report BML 82.610, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1982, S. 19-50, zitiert in [Sel 86]
- Sel 86 Sellevold, E.J.; Nielsen, T.: Weltweiter Überblick über Mikrosilica in Beton. Firmenprospekt von ELKEM GmbH, 1986
- Sel 92 Sellevold, E.J.; Justnes, H.: High Strength Concrete Binders : Part B: Nonevaporable Water, Self-Desiccation and Porosity of Cement Pastes With and Without Condensed Silica Fume.
In: Malhotra, V.M. (Ed.): 4th CANMET/ACI International Confer-

- ence on Fly Ash Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete: Istanbul. Detroit, Mi.: American Concrete Institute, ACI, 1992, S. 891-902
- Set 02 Setzer, M. J.: Frostscha den : Grundlagen und Prüfung.
In: Beton und Stahlbetonbau 97 (2002), Nr. 7, S. 350-359
- Set 77 Setzer, M.J.: Einfluss des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons.
In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (1977), Nr. 280
- Set 94 Setzer, M.J.: Entwicklung eines Prüfverfahrens zum Frost-Tausalz-Widerstand.
In: Hrsg.: Bauhaus-Universität Weimar: 12. Internationale Baustofftagung, ibausil : 22.-24.09.1994 in Weimar ; Vol. 1. Weimar, 1994, S. 87–93
- Set 97 Setzer, M.J.: Basis of testing the freeze-thaw resistance : surface and internal deterioration.
In: Setzer, M.J.; Auberg, R. (Eds.): Frost resistance of concrete. London: E&FN Spon, 1997, S. 157-173
- Set 98 Setzer, M.J.; Auberg, R.: CIF-Test : Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton.
In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 64 (1998), Nr. 4, S. 94-105
- Set 99 Setzer, M.J.: Mikroeislin senbildung und Frostscha den.
In: Eligehausen, R.: Werkstoffe im Bauwesen : Theorie und Praxis. Stuttgart: ibidem-Verlag, 1999, S. 397-413
- Shi 04 Shimadzu (Hrsg.): Measurement of Water in Silica Gel with DSC. Thermal Analysis T116. 2004
<http://www.shimadzu.com.br/analitica/aplicacoes/TA/T116.pdf>
(Download: 29.03.2005)
- Sie 92 Siebel, E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton – Beurteilung mittels Würfelverfahren.
In: Beton 42 (1992), Nr. 9, S. 496-501
- Sie 95 Siebel, E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton.
In: Betontechnische Berichte 26 (1992-94), S. 3-51
- Sie 98 Siebel, E.; Breit, W.: Standard Methods for Testing the Resistance of Concrete to Freezing and Thawing : Final Report ; European Research Project MAT1-CT94-0055 ; Forschungsinstitut der Zementindustrie; Report No. B1498-4. Düsseldorf, 1998
- Sie 99 Siebel, E.; Breit, W.: Ergebnisse eines Europäischen Ringversuches.
In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 65 (1999), Nr. 11, S. 44-51

- Smo 76 Smolczyk, H.G.; Romberg, H.: Der Einfluß der Nachbehandlung und der Lagerung auf die Nacherhärtung und Porenverteilung von Beton.
In: Tonindustrie-Zeitung 100 (1976), Nr. 10, S. 349-357 und 100 (1976), Nr. 11, S. 381-390
- Sta 98 Stark, J.; Wicht, B.: Anorganische Bindemittel : Zement, Kalk, Spezielle Bindemittel.
In: Schriftenreihe der Bauhaus-Universität Weimar (1998), Nr.109
- Sti 97 Stich, R. Ettel, W.-P.: Puzzolanische Reaktion und Stofftransport in hochfestem Beton mit Mikrosilicazusatz.
In Zement, Kalk, Gips International 50 (1997), Nr. 4, S. 222-231
- Sto 79 Stockhausen, N; Dorner, H.; Zech, M.; Setzer, M.J.: Untersuchung von Gefriervorgängen in Zementstein mit Hilfe der DTA.
In: Cement and Concrete Research 9 (1979), S. 783-794
- Sto 79 Stockhausen, N.; Dorner, H.; Zech, M.; Setzer, M.J.: Untersuchungen von Gefriervorgängen in Zementstein mit Hilfe der DTA.
In Cement and Concrete Research 9 (1979), Nr. 6, S. 783-794
- Sto 81 Stockhausen, N: Dilatation hochporöser Festkörper bei der Wasseraufnahme und Eisbildung : Dissertation. München, 1981
- Sun 93 Sun, G; Young, J.F.: Quantitative Determination of Residual Silica Fume in DSP Cement Pastes by ^{29}Si NMR.
In: Cement and Concrete Research 23 (1993), S. 480-483
- Syb 93 Sybertz, F.: Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff.
In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (1993), Nr. 434
- Tay 86 Taylor, H. F. W.: Proposed structure for calcium silicate hydrate gel.
In: Journal of the American Ceramic Society 69 (1986), Nr. 6, S. 464-467
- Tay 97 Taylor, H. F. W.: Cement Chemistry. 2. Ed. London: Telford, 1997
- Tow 32 Towles, T.T.: Advantages in the use of high strength concrete.
In: Proceedings of the American Concrete Institute 28 (1932), S. 607-612
- Tre 78 Traetteberg, A.: Silica Fume as a Pozzolan Material.
In: Il Cemento 75 (1978), Nr. 3, S. 369-376
- Tre 80 Traetteberg, A.: Frost action of blended cement with silica dust.
In: Sereda, P.J.; Litvan, G.G. (Eds.): Durability of Building Materials and Components. Philadelphia, Pa.: American Society for Testing and Materials, ASTM, 1980, S. 536-548

- Urh 87 Urhan, S.: Alkali Silica and Pozzolan Reactions in Concrete : Part 1: Interpretation of Published Results and an Hypothesis concerning the Mechanisms.
In: Cement and Concrete Research 17 (1987), Nr. 3, S. 141-152
- Utg 04 Utgenannt, P.: The influence of ageing on the salt-frost resistance of concrete : Dissertation. Lund: Institute of Technology, 2004
- Vie 96 Viehland, D.; Li, J.-F.; Yuan, L.-J.; Xu, Z.: Mesostructure of calcium silicate hydrate (C-S-H) gels in Portland cement paste : short-range ordering, nanocrystallinity, and local compositional order.
In: Journal of the American Ceramic Society 79 (1996), Nr. 7, S. 1731-1744
- Wei 05 Weise, F., Onel, Y. und B. Maier: Anwendungsmöglichkeiten der auf X-Ray basierten 3D-Computertomografie zur Schadensanalyse in Betonen.
Vortrag gehalten bei der VDB-Fachtagung „Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen“ am 19.1.2005 in Berlin
- Wei 89 Wei, X.; Glasser, F. P.: The role of microsilica in the alkali-aggregate reaction.
In: Advances in Cement Research 2 (1989), Nr. 8, S. 159-169
- Wes 85 Wesche, K.; Schubert, P.: Feinststoff im Beton : Einfluss auf die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons.
In: Betontechnik 6 (1985), Nr. 3, S. 69-71
- Wes 93 Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile : Beton und Mauerwerk. Wiesbaden (u.a.) Bauverlag, 1993.
- Wie 00 Wiens; U.; Müller, Ch.: Die puzzolanische Reaktion von Steinkohlenflugasche : Kinetik und Auswirkung auf das Betongefüge.
In: Beton-Informationen 40 (2000), Nr. 2/3, S. 27-35
- Wie 05 Wiens; U.: Zur Wirkung von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton.
In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2005), Nr. 551
- Wie 96 Wiegink, K.; Marikunte, S.; Shah, S. P.: Shrinkage Cracking of High-Strength Concrete.
In: ACI Materials Journal 93 (1996), Nr. 3, S. 409-417
- Wie 98 Wiens, U.; Schröder, P.; Meng, B.; Schießl, P.: Mikrorissbildung in Hochleistungsbeton : Vom Modell zu den Auswirkungen auf Betoneigenschaften.
In: DAfStb-Forschungskolloquium (1998), Nr. 36, S. 234-247

- Wis 61 Wischers, G.: Physikalische Eigenschaften des Zementsteins.
In: Beton 11 (1961), Nr. 7, S. 481-486
- Yam 88 Yamato, T.; Soeda, M.; Emoto, Y.: Freezing-and- Thawing Durability of Concrete Incorporating Condensed Silica Fume : Proceedings of the Workshop on Low Temperature Effect on Concrete ; Canada/Japan Science and Technology Cooperative Agreement. Sapporo, 1988, S. 257-574 (zitiert nach [Pig 95])
- Yam 89 Yamato, T.; Soeda, M.; Emoto, Y.: Chemical resistance of concrete containing condensed silica fume.
In: Malhotra, V.M. (Ed.): 3rd CANMET/ACI International Conference on Fly Ash Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete : Trondheim. Detroit, Mi.: American Concrete Institute, ACI , 1989, S. 897-913
- Zha 91 Zhang, M.-H.; Gjörv, O.E.: Effect on Silica Fume on Cement Hydration in Low Porosity Cement Pastes.
In: Cement and Concrete Research 21 (1991), S. 800-808
- Zta 02 Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.): Zement-Taschenbuch 2002. 50. Aufl. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 2002

9 Normenverzeichnis

- DIN 1045-2: 2001-07 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- DIN 1048-5: 1991-06 Prüfverfahren für Beton – Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper
- DIN 66133: 1993-06 Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion
- DIN EN 12350-4 2000-06 Prüfung von Frischbeton – Teil 4: Verdichtungsmaß. Deutsche Fassung EN 12350-4:1999
- DIN EN 12350-5 2000-06 Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß. Deutsche Fassung EN 12350-5:1999
- DIN EN 12350-6 2000-03 Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte. Deutsche Fassung EN 12350-6:1999
- DIN EN 12350-7 2000-11 Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalte - Druckverfahren. Deutsche Fassung EN 12350-7:2000

DIN EN 12390-2: 2001-06	Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen. Deutsche Fassung EN 12390-2:2000
DIN EN 12390-3 2002-04	Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Deutsche Fassung EN 12390-3:2001
DIN EN 12390-5: 2001-02	Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern. Deutsche Fassung EN 12390-5:2000
DIN EN 12390-6 2001-02	Prüfung von Festbeton – Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern. Deutsche Fassung EN 12390-6:2000
DIN EN 12390-7 2001-02	Prüfung von Festbeton – Teil 7: Dichte von Festbeton. Deutsche Fassung EN 12390-7:2000
DIN EN 12620 2003-04	Gesteinskörnungen für Beton. Deutsche Fassung EN 12620:2002
DIN EN 196-1 1995-05	Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Deutsche Fassung EN 196-1: 1994
DIN EN 196-2 1995-05	Prüfverfahren von Zement - Teil 2: Chemische Analyse von Zement. Deutsche Fassung EN 196-2:1994
DIN EN 196-21 1990-03	Prüfverfahren für Zement - Teil 21: Bestimmung des Chlorid-, Kohlenstoffdioxid- und Alkalianteils von Zement. Deutsche Fassung EN 196-21: 1989
DIN EN 196-3 1995-05	Prüfverfahren für Zement – Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. Deutsche Fassung EN 196-3: 1994
DIN EN 196-6 1990-03	Prüfverfahren für Zement – Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit. Deutsche Fassung EN 196-6: 1989
DIN EN 197-1 2001-02	Zement: - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Deutsche Fassung EN 197-1: 2000
DIN EN 206-1 2001-07	Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 206-1:2000
DIN EN 480-11 1999-02	Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpreßmörtel Prüfverfahren - Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton. Deutsche Fassung prEN 480-11:1998
DIN EN 934-2 2002-02	Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Teil 2: Betonzusatzmittel; Definitionen, Anforderungen,

Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung. Deutsche Fassung EN 934-2:2001

DIN V ENV 196-4 1993-11 Prüfverfahren für Zement – Vornorm Teil 4: Quantitative Bestimmung der Bestandteile. Deutsche Fassung ENV 196-4:1993

E DIN EN 12390-9 2002-05 Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand, Abwitterung. Deutsche Fassung prEN 12390-9:2002

10 Anhang

Anhang A Tafeln

Tafel A-1: Kennwerte der Zemente und des Silikastaubs	A-2
Tafel A-2: Zusammensetzung und Bezeichnung Mörtel	A-3
Tafel A-3: Zusammensetzung und Bezeichnung der Leime	A-3
Tafel A-4: Frischbetoneigenschaften	A-4
Tafel A-5: Festigkeit und Verformungseigenschaften der Betone	A-5
Tafel A-6: Abwitterung der Betone bestimmt mit dem CIF-Verfahren	A-6
Tafel A-7: Kapillare Wasseraufnahme und Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel der Betone bestimmt mit dem CIF-Verfahren	A-7
Tafel A-8: Relativer dynamischer Elastizitätsmodul der Betone bestimmt mit dem CIF-Verfahren	A-8
Tafel A-9: Relativer dynamischer Elastizitätsmodul der Betone bestimmt mit dem Balkenverfahren	A-9
Tafel A-10: Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel der Betone bestimmt mit dem Balkenverfahren	A-9
Tafel A-11: Biegezug- und Spaltzugfestigkeit der Betone nach dem Balkenverfahren	A-10
Tafel A-12: Gesamtporosität und Porenverteilung der separat hergestellten Mörtel mit unterschiedlichen Silikastaubgehalten 28 d nach der Herstellung	A-11
Tafel A-13: Kenngrößen der Quecksilberdruckporosimetrie für die Mörtel aus dem oberflächennahen Bereich der Betonen 28 d nach der Herstellung	A-11
Tafel A-14: Um den Temperatureinfluss korrigierte elektrische Widerstände im Beton oS35	A-12
Tafel A-15: Um den Temperatureinfluss korrigierte elektrische Widerstände im Beton mS35	A-13
Tafel A-16: Physikalisch gebundenes Wasser der hochfesten Betone und der Mörtel im Alter von 28 Tagen	A-14
Tafel A-17: Chemisch gebundenes Wasser der separat hergestellten Mörtel im Alter von 28 Tagen	A-14
Tafel A-18: Relativer Porenfüllungsgrad der hochfesten Betone	A-15
Tafel A-19: Ergebnisse der STA für die konserviert gelagerten Zementsteine im Alter von 28 Tagen	A-16
Tafel A-20: Aus der NMR-Spektroskopie bestimmte Flächenintegrale der Leime ohne Silikastaub	A-17
Tafel A-21: Aus der NMR-Spektroskopie bestimmte Flächenintegrale der Leime mit Silikastaub	A-17

Tafel A-1: Kennwerte der Zemente und des Silikastaubs

	Einheit	42,5						Silikastaub
		CEM I	CEM II/A-LL	CEM II/B-S	CEM III/A	CEM III/B		
Phasen nach Bogue in								
C ₃ S	M.-%	70,64	-	-	-	-		-
C ₂ S	M.-%	0,41	-	-	-	-		-
C ₃ A	M.-%	8,82	-	-	-	-		-
C ₄ AF	M.-%	12,69	-	-	-	-		-
Physikalische Eigenschaften								
Dichte	g/cm³	3,10	3,03	3,04	3,03	3,00		-
Spez. Oberfläche (Blaine)	cm²/g	3980	4360	3990	4220	4190		-
Wasseranspruch	M.-%	29,0	28,5	29,5	31,0	30,5		-
Erstarren Beginn	Min	130	150	190	220	220		-
Druckfestigkeit	2 d	N/mm²	33,5	35,1	25,7	11,6		12
	28 d		58,8	56,7	56,6	55,3	51,5	-
Chemische Eigenschaften								
SO ₃	M.-%	3,05	2,94	3,24	3,55	3,63		0,07
SiO ₂		18,12	19,76	22,69	28,45	28,44		93,35
Al ₂ O ₃		5,80	3,78	7,06	7,27	9,30		0,86
Fe ₂ O ₃		4,04	1,14	1,76	0,85	1,53		0,70
CaO		63,18	64,18	56,08	52,90	48,15		0,63
K ₂ O		0,87	0,67	1,04	0,53	0,75		0,80
Na ₂ O		0,05	0,26	0,22	0,26	0,23		0,27
Na ₂ O-Äquivalent		0,62	0,70	0,90	0,61	0,72		0,79
Hüttensandgehalt	M.-%	-	-	23	49	70		-
Kalksteingehalt	M.-%	-	17	-	-	-		-

Tafel A-2: Zusammensetzung und Bezeichnung Mörtel

Zementsorte	Mörtel	$(w/z)_{eq}$	Zement kg/m ³	Silikastaub kg/m ³	Wasser kg/m ³
CEM I 42,5 R	oS45	0,45	825	0	371
	mS45		764	61	371
	mS42	0,42	764	61	344
	oS35	0,35	878	0	307
	mS35		813	65	307
	mS32	0,32	813	65	284
	mS35/04	0,35	844	34	307
	mS35/15		763	115	307
	oS25	0,25	926	0	232
	mS25		859	69	232
	mS23	0,23	859	69	215

Tafel A-3: Zusammensetzung und Bezeichnung der Leime

Zementsorte	Bezeichnung	$(w/z)_{eq}$	s/z
CEM I 42,5 R	oS45	0,45	0,00
	mS45		0,08
	mS42	0,42	0,08
	oS40	0,40	0,00
	mS40		0,08
	oS35	0,35	0,00
	mS35		0,08
	mS32	0,32	0,08
	oS30	0,30	0,00
	mS30		0,08
	oS25	0,25	0,00
	mS25		0,08

Tafel A-4: Frischbetoneigenschaften

Zementsorte	Beton	Ausbreitmaß d_{10} [mm]	Verdichtungsmaß c_{10} [-]	Rohdichte [kg/dm ³]	Luftgehalt [Vol.-%]
CEM I 42,5 R	oS45	530	-	2,34	1,1
	mS45	450	-	2,30	1,8
	oS40	430	-	2,36	2,3
	mS40	410	-	2,33	2,4
	oS35	430	-	2,35	2,8
	mS35	420	-	2,36	2,2
	mS35/15	400	-	2,37	2,8
	oS30	430	-	2,43	2,3
	mS30	400	-	2,39	1,8
	mS30/04	370	-	2,40	2,6
	oS25	-	1,60	2,43	2,2
	mS25	-	1,37	2,43	2,6
CEM II/A-LL 42,5 R	oS2ALL	440	-	2,36	2,6
	mS2ALL	530	-	2,36	2,0
CEM II/B-S 42,5 R	oS2BS	590	-	2,38	1,9
	mS2BS	540	-	2,36	2,0
CEM III/A 42,5 R	oS3A	450	-	2,39	2,0
	mS3A	450	-	2,33	2,4
CEM III/B 42,5 LH/HS	oS3B	440	-	2,34	2,6
	mS3B	470	-	2,32	3,1

Tafel A-5: Festigkeit und Verformungseigenschaften der Betone

Zementsorte	Beton	$f_{cm,2}$ N/mm ²	$f_{cm,28}$ N/mm ²	$f_{ct,sp,28}$ N/mm ²	$f_{ct,BZ,28}$ N/mm ²	E_{stat} kN/mm ²	E_{dyn} kN/mm ²
CEM I 42,5 R	oS45	35	65	5,5	-	-	-
	mS45	37	66	4,9	6,6	34,4	37,0
	oS40	39	65	4,9	5,5	37,9	39,2
	mS40	46	81	5,4	6,7	36,8	40,1
	oS35	55	81	5,8	6,3	40,2	42,5
	mS35	58	90	5,8	7,8	39,0	42,6
	mS35/15	60	101	6,1	8,8	39,9	41,9
	oS30	67	96	7,1	7,9	47,5	48,1
	mS30	69	106	6,5	9,1	43,2	44,9
	mS30/04	66	100	6,1	8,7	42,2	45,8
	oS25	73	93	6,0	9,0	42,1	46,1
	mS25	75	117	6,0	10,0	48,5	49,0
CEM II/A-LL 42,5 R	oS2ALL	54	78	3,6	-	-	-
	mS2ALL	55	91	5,7	-	-	-
CEM II/B-S 42,5 R	oS2BS	50	82	5,9	-	-	-
	mS2BS	45	90	5,5	-	-	-
CEM III/A 42,5 R	oS3A	28	76	5,2	-	-	-
	mS3A	30	85	5,7	-	-	-
CEM III/B 42,5 LH/HS	oS3B	32	76	5,3	-	-	-
	mS3B	33	77	5,6	-	-	-

Tafel A-6: Abwitterung der Betone bestimmt mit dem CIF-Verfahren

Zementsorte	Beton	Mittelwerte der Abwitterung in kg/m ² nach Frost-Tau-Wechseln						
		14	28	42	56	74	84	100
CEM I 42,5 R	oS45	0,031	0,044	0,067	0,097	0,158	-	0,402
	mS45	0,025	0,046	0,090	0,320	-	-	-
	mS45 w	0,021	0,049	0,091	-	-	-	-
	oS40	0,015	0,021	0,029	0,034	0,070	-	0,120
	mS40	0,017	0,023	0,033	0,062	0,148	-	-
	oS35	0,014	0,027	0,041	0,054	0,075	-	0,118
	mS35	0,015	0,022	0,030	0,045	-	-	-
	mS35 w	0,011	0,017	-	0,052	0,055	0,065	0,067
	mS35/15	0,013	0,016	0,024	0,032	0,036	0,042	0,047
	oS30	0,007	0,007	0,020	0,027	-	0,052	0,065
	mS30	0,002	0,005	0,007	0,007	0,012	-	0,017
	mS30/04	0,017	0,021	0,024	0,028	0,034	-	0,043
	oS25	0,004	0,014	0,017	0,018	-	0,028	0,036
	mS25	0,002	0,023	0,024	0,025	0,025	-	0,025
CEM II/A-LL 42,5 R	oS2ALL	0,011	0,017	0,027	0,033	-	0,057	0,069
	mS2ALL	0,009	0,018	0,025	0,033	0,058	-	0,095
CEM II/B-S 42,5 R	oS2BS	0,008	0,015	0,017	0,028	0,038	-	0,051
	mS2BS	0,011	0,018	0,025	0,033	0,046	-	0,073
CEM III/A 42,5 R	oS3A	0,038	0,047	0,064	0,078	-	0,117	0,128
	mS3A	0,034	0,062	0,093	0,120	-	0,188	0,219
CEM III/B 42,5 LH/HS	oS3B	0,029	0,048	-	0,092	-	0,154	0,177
	mS3B	0,027	0,040	0,059	0,079	-	0,132	0,162

Tafel A-7: Kapillare Wasseraufnahme und Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel der Betone bestimmt mit dem CIF-Verfahren

Zementsorte	Beton	Mittelwerte der Wasseraufnahme in M.-% nach								
		Tagen kap. Saugen			Anzahl Frost-Tau-Wechsel					
		1	3	7	14	28	42	56	74/84	100
CEM I 42,5 R	oS45	0,6	-	1,0	0,6	1,0	1,2	1,3	1,5	1,8
	mS45	0,4	0,5	0,7	1,1	1,9	3,1	5,0	-	-
	mS45 w	0,5	0,5	0,7	1,2	2,0	3,2	-	-	-
	oS40	0,3	0,4	0,5	0,4	0,6	0,9	1,0	1,2	1,3
	mS40	0,4	0,5	0,6	0,9	1,7	2,5	-	3,7	-
	oS35	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,6	0,6	0,8	0,9
	mS35	0,3	0,3	0,4	0,5	0,9	1,3	1,6	-	-
	mS35 w	0,3	0,3	0,4	0,3	0,6	-	1,3	1,7	1,9
	mS35/15	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	0,9	1,1	1,8
	oS30	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	mS30	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
	mS30/04	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
	oS25	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	mS25	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
CEM II/A-LL 42,5 R	oS2ALL	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6
	mS2ALL	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,1	1,3
CEM II/B-S 42,5 R	oS2BS	-	-	0,4	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
	mS2BS	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2
CEM III/A 42,5 R	oS3A	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6
	mS3A	0,3	0,4	0,5	0,3	0,5	0,6	0,7	1,0	1,1
CEM III/B 42,5 LH/HS	oS3B	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	-	0,5	0,6	0,7
	mS3B	0,3	0,4	0,6	0,3	0,5	0,5	0,6	0,8	0,8

Tafel A-8: Relativer dynamischer Elastizitätsmodul der Betone bestimmt mit dem CIF-Verfahren

Zementsorte	Beton	Mittelwert des rel. dyn. E-Moduls in % nach Frost-Tau-Wechseln						
		14	28	42	56	74	84	100
CEM I 42,5 R	oS45	97	93	92	91	89	-	78
	mS45	84	28	28	17	-	-	-
	mS45 w	80	44	43	-	-	-	-
	oS40	98	98	97	97	97	-	92
	mS40	92	30	25	-	19	-	-
	oS35	99	98	99	98	99	-	99
	mS35	99	94	65	44	-	-	-
	mS35 w	100	100	-	76	60	54	44
	mS35/15	100	99	98	95	91	73	42
	oS30	99	99	99	99	-	100	99
	mS30	99	99	98	99	98	-	92
	mS30/04	99	98	98	99	98	-	98
	oS25	99	99	99	99	-	99	100
	mS25	99	99	99	99	98	-	99
CEM II/A-LL 42,5 R	oS2ALL	99	99	99	99	-	99	99
	mS2ALL	99	98	96	92	84	-	73
CEM II/B-S 42,5 R	oS2BS	100	99	99	99	98	-	96
	mS2BS	100	98	97	95	89	-	82
CEM III/A 42,5 R	oS3A	99	99	98	98	-	98	98
	mS3A	100	101	100	100	-	96	93
CEM III/B 42,5 LH/HS	oS3B	100	99	-	99	-	98	99
	mS3B	100	100	100	100	-	99	98

Tafel A-9: Relativer dynamischer Elastizitätsmodul der Betone bestimmt mit dem Balkenverfahren

Zementsorte	Beton	Mittelwert des rel. dyn. E-Moduls in % nach Frost-Tau-Wechseln						
		14	28	42	56	74	84	100
CEM I 42,5 R	oS45	-	-	-	-	-	-	-
	mS45	98	98	96	85	81	-	-
	oS40	98	99	99	99	100	-	100
	mS40	98	98	97	90	90	-	36
	oS35	98	98	98	98	99	-	100
	mS35	98	98	98	99	99	-	99
	mS35 w	99	99	99	99	-	-	99
	mS35/15	9	99	99	99	99	-	100
	oS30	100	98	99	99	-	-	100
	mS30	98	98	99	99	99	-	99
	mS30/04	98	98	99	99	-	99	99
	oS25	99	99	99	99	-	-	100
	mS25	99	99	99	99	99	-	99

Tafel A-10: Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel der Betone bestimmt mit dem Balkenverfahren

Zementsorte	Beton	Wasseraufnahme in M.-% nach Frost-Tau-Wechseln						
		14	28	42	56	74	84	100
CEM I 42,5 R	oS45	-	-	-	-	-	-	-
	mS45	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,3	-	-
	oS40	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-	-0,2
	mS40	-0,1	-0,1	-0,1	0	0	-	0,4
	oS35	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-	-0,2
	mS35	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-	-0,1
	mS35 w	-0,1	-0,1	-0,1	0	-	-	0
	mS35/15	0	0	0	0	0	-	0
	oS30	-0,1	-0,1	-0,1	0	-	-	0
	mS30	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-	-0,1
	mS30/04	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-	-0,1	-0,1
	oS25	0	0	-0,1	0	-	-	0
	mS25	0	-0,1	-0,1	-0,1	0	-	-0,1

Tafel A-11: Biegezug- und Spaltzugfestigkeit der Betone nach dem Balkenverfahren

Zementsorte	Beton	CIF-Verfahren		Balkenverfahren					
		Spaltzugfestigkeit		Biegezugfestigkeit		Spaltzugfestigkeit		Stat. E-Modul	
		nach Frost-Tau-Wechseln							
		56	100	56	100	56	100	56	100
		N/mm²						kN/mm²	
CEM I 42,5 R	oS45	2,86	2,21	-	-	-	-	-	-
	mS45	0,27	-	₂²)	₂²)	₂²)	₂²)	₂²)	₂²)
	mS45 w	1,17¹)	0,69¹)	-	-	-	-	-	-
	oS40	2,99	2,51	5,48	5,26	4,52	4,55	37,1	34,1
	mS40	1,62¹)	0,64¹)	3,11	₂²)	4,98	₂²)	₂²)	₂²)
	oS35	4,54	4,32	5,75	6,31	5,38	4,91	40,5	36,0
	mS35	₂²)	₂²)	6,00	6,51	6,10	6,10	38,5	40,0
	mS35/15								
	oS30	5,91	6,02	-	-	-	-	-	-
	mS30	6,11	3,64	7,13	8,07	6,41	7,12	41,3	41,7
	mS30/04	6,63	5,07	7,47	7,66	6,45	6,46	42,7	43,5
	oS25	5,90	5,41	7,68	8,19	6,48	7,05	43,4	45,9
	mS25	6,46	7,09	8,25	8,39	8,14	6,37	44,7	46,3

¹⁾ nach 28 bzw. 42 FTW geprüft²⁾ nicht bestimmbar

Tafel A-12: Gesamtporosität und Porenverteilung der separat hergestellten Mörtel mit unterschiedlichen Silikastaubgehalten 28 d nach der Herstellung

Zusammensetzung		(w/z) _{eq}	Gesamtporosität W _{15MPa}	> 0,01 µm	> 0,03 µm	< 0,01 µm
			in Vol.-%	nach 28 d in Vol.-% / in % von W _{15MPa}		
CEM I 42,5 R	oS35	0,35	25,0	6,4 / <u>25</u>	3,4 / <u>14</u>	18,6 / 75
	mS35		26,2	5,3 / <u>21</u>	3,6 / <u>14</u>	20,5 / 79
	mS35/04		25,4	6,2 / 25	3,5 / 14	19,2 / 75
	mS35/15		23,4	3,6 / 15	2,9 / 12	19,9 / 85

Tafel A-13: Kenngrößen der Quecksilberdruckporosimetrie für die Mörtel aus dem oberflächennahen Bereich der Betonen 28 d nach der Herstellung

Zusammensetzung		(w/z) _{eq}	Mörtel aus der Mitte der Beton			
			Hg-Porosität	> 0,01 µm	> 0,03 µm	< 0,01 µm
nach 28 d in Vol.-%						
CEM I 42,5 R	oS45	0,45	11,9	10,0	6,0	1,9
	mS45		10,1	8,3	4,9	1,8
	oS40	0,40	9,1	7,4	4,3	1,6
	mS40		8,3	6,2	3,4	2,1
	oS35	0,35	7,0	5,4	2,9	1,5
	mS35		5,4	4,0	2,8	1,4
	oS30	0,30	6,0	5,0	2,4	1,0
	mS30		5,1	3,9	2,5	1,1

Tafel A-14: Um den Temperatureinfluss korrigierte elektrische Widerstände im Beton oS35

Tiefe von Prüffläche in mm	Elektrischer Widerstand in Ω nach											
	Tagen Kapillares Saugen					Anzahl der Frost-Tau-Wechsel						
	0	1	3	5	7	1	8	14	25	28	35	42
7	2090	970	984	1021	1032	-	618	710	701	687	719	675
12	1309	1006	990	991	1003	-	646	658	611	594	583	546
17	1045	983	947	897	918	-	700	716	587	563	519	479
22	1102	1102	1049	997	1005	-	849	853	629	599	544	501
27	1133	1186	1129	1049	1075	-	902	858	635	602	533	491
32	1148	1189	1143	1107	1131	-	942	862	653	610	523	481
37	1125	1126	1148	1126	1126	-	934	850	671	629	526	491
42	1065	1058	1115	1019	997	-	808	754	598	563	478	446
47	1301	-	-	-	-	-	435	576	584	586	559	533
52	1332	-	-	-	-	-	444	570	586	586	551	527
57	1400	-	-	-	-	-	537	636	635	632	595	577
62	1935	-	-	-	-	-	642	770	766	766	707	689

Tafel A-15: Um den Temperatureinfluss korrigierte elektrische Widerstände im Beton mS35

Tiefe von Prüffläche in mm	Elektrischer Widerstand in Ω nach											
	Tagen Kapillares Saugen					Anzahl der Frost-Tau-Wechsel						
	0	1	3	5	7	1	8	14	25	28	35	42
7	10870	3896	3518	3334	3187	2398	2635	2410	1646	1594	1156	806
12	7647	4757	4841	4816	4670	4196	3927	3861	1407	1270	1008	666
17	6999	6179	6012	5797	5847	5596	4657	5499	1541	1114	794	499
22	6750	6554	6316	6229	6245	6426	6012	6446	2213	1322	775	598
27	6371	6348	6154	6064	6130	6337	6355	6594	2702	1573	768	601
32	6434	6432	6344	6482	6469	6369	6398	6706	2900	1750	749	569
37	6170	6179	6177	6358	6291	6153	6300	6700	3100	1800	664	486
42	6190	6329	6362	6426	6314	6469	5700	6780	3200	2000	646	439
47	6811	-	-	-	-	7137	7826	7423	4000	2800	1300	1251
52	6536	-	-	-	-	6886	6455	4647	3006	2381	1108	1228
57	6958	-	-	-	-	7556	4805	2728	2136	1929	1145	1223
62	8811	-	-	-	-	9724	3344	1973	2317	2211	1609	1433

Tafel A-16: Physikalisch gebundenes Wasser der hochfesten Betone und der Mörtel
im Alter von 28 Tagen

Zusammensetzung		(w/z) _{eq}	Normenlagerung		Trockenlagerung	Nasslagerung
			Beton	Mörtel		
			M.-% v. Z.			
CEM I 42,5 R	oS45	0,45	22	24	21	34
	mS45		28	30	23	38
	mS42	0,42	26	28	24	40
	oS40	0,40	19	-	-	-
	mS40		25	-	-	-
	oS35	0,35	18	20	18	25
	mS35		22	25	20	29
	mS32	0,32	21	23	19	28
	oS30	0,30	15	-	-	-
	mS30		19	-	-	-
	oS25	0,25	14	14	14	18
	mS25		17	17	16	19
	mS23	0,23	-	15	14	17

Tafel A-17: Chemisch gebundenes Wasser der separat hergestellten Mörtel im Alter von 28 Tagen

Zusammensetzung		(w/z) _{eq}	Normenlagerung	Trockenlagerung	Nasslagerung
			Mörtel		
			M.-% v. Z.		
CEM I 42,5 R	oS45	0,45	19	17	18
	mS45		18	16	18
	mS42	0,42	18	16	18
	oS35	0,35	16	16	17
	mS35		17	15	17
	mS32	0,32	17	14	16
	oS25	0,25	15	14	15
	mS25		15	13	15
	mS23	0,23	14	13	15

Tafel A-18: Relativer Porenfüllungsgrad der hochfesten Betone

Zementsorte	Beton	Relativer Porenfüllungsgrad in Vol.-%			
		W ₂₈	W _{cap}	W ₁₄	W ₂₈
CEM I 42,5 R	oS45	62	75	83	89
	mS45	74	82	96	106
	mS45 w	74	82	97	107
	oS40	61	69	75	79
	mS40	72	81	94	105
	oS35	59	66	72	75
	mS35	73	80	88	94
	oS30	60	65	68	68
	mS30	66	70	73	75
	oS25	53	57	59	61
	mS25	63	66	68	69
CEM II/A-LL 42,5 R	oS2ALL	59	63	67	69
	mS2ALL	75	78	82	85
CEM II/B-S 42,5 R	oS2BS	60	68	74	77
	mS2BS	69	75	81	84
CEM III/A 42,5 R	oS3A	57	63	68	70
	mS3A	62	69	74	76
CEM III/B 42,5 LH/HS	oS3B	60	67	71	72
	mS3B	57	65	70	72

Tafel A-19: Ergebnisse der STA für die konserviert gelagerten Zementsteine im Alter von 28 Tagen

Proben- bezeichnung	(w/z) _{eq}	Zugabewasser	Chem. geb. Wasser	Phys. geb. Wasser	Ca(OH) ₂
		g / 100 g z		g / 100 g EW	g / 100 g z
oS45	0,45	45	23,47	21,53	18,85
mS45			23,78	22,98	15,80
mS42	0,42	42	21,86	21,76	14,01
oS35	0,35	35	19,89	15,11	14,93
mS35			20,24	16,26	10,95
mS32	0,32	32	18,86	14,54	10,58
oS30	0,30	30	17,68	12,32	13,46
mS30			17,95	13,38	9,81
oS25	0,25	25	15,23	9,77	9,89
mS25			17,56	8,74	7,22

Tafel A-20: Aus der NMR-Spektroskopie bestimmte Flächenintegrale der Leime ohne Silikastaub

$(w/z)_{eq}$	0,30		0,45	0,35	0,25
Bezeichnung	oS30 t=0		oS45 t=28	oS35 t=28	oS25 t=28
$(Q)^0$	165728794	-	9683844,3	13651712,1	20667368
$(Q)^1$	-	-	14616626,9	13673548,1	14692254
$(Q)^2$	-	-	7596227,5	9509065,0	-
$(Q)^3$	-	-	-	-	-
$(Q)^4$	-	-	-	-	-
Summe	165728794	-	31896698,7	36834325,2	35359622

Tafel A-21: Aus der NMR-Spektroskopie bestimmte Flächenintegrale der Leime mit Silikastaub

$(w/z)_{eq}$	0,30	0,35	0,45	0,35	0,25
Bezeichnung	mS30 t=0	mS35 t=0	mS45 t=28	mS35 t=28	mS25 t=28
$(Q)^0$	140988843	324284950	9773982	13679283	18897612
$(Q)^1$	-	-	16927130	17075670	15428120
$(Q)^2$	-	-	14042347	14479804	12894804
$(Q)^3$	-	-	1336154	3102834	-
$(Q)^4$	43479120	105986060	2484959,2	5168140	4362421
Summe	184467963	430271010	44564572,2	53505731	51582957

Anhang B: Bilder

Bild B-1:	Abwitterung in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bestimmt mit dem CIF-Verfahren links: Betone ohne Silikastaub; rechts: Betone mit 8 M.-% Silikastaub	B-2
Bild B-2:	Kapillare Wasseraufnahme (wcap) in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bestimmt mit dem CIF-Verfahren links: Betone ohne Silikastaub; rechts: Betone mit 8 M.-% Silikastaub	B-2
Bild B-3:	Wasseraufnahme (wf) in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bestimmt mit dem Balkenverfahren links: Betone ohne Silikastaub; rechts: Betone mit 8 M.-% Silikastaub	B-3
Bild B-4:	Gefüge im Kern des Beton mS35 bei RDM ca. 100%	B-4
Bild B-5:	Gefüge im Kern des Beton mS35 bei RDM ca. 80%	B-4
Bild B-6:	Gefüge im Kern des Beton mS35 bei RDM ca. 60%	B-4
Bild B-7:	Gefüge im Kern des Beton mS35/15 bei RDM ca. 100%	B-5
Bild B-8:	Gefüge im Kern des Beton mS35/15 bei RDM ca. 80%	B-5
Bild B-9:	Gefüge im Kern des Beton mS35/15 bei RDM ca. 60%	B-5
Bild B-10:	Porosität der Mörtel mit einem $(w/z)_{eq} = 0,45$ nach 28tägiger Lagerung und nach 56 Frost-Tau-Wechseln	B-6
Bild B-11:	Porosität der Mörtel mit $(w/z)_{eq} = 0,40$ nach 28tägiger Lagerung und nach 56 Frost-Tau-Wechseln	B-6
Bild B-12:	Porosität der Mörtel mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ nach 28tägiger Lagerung und nach 56 Frost-Tau-Wechseln	B-6
Bild B-13:	Porosität der Mörtel mit $(w/z)_{eq} = 0,30$ nach 28tägiger Lagerung und nach 56 Frost-Tau-Wechseln	B-6
Bild B-14:	Hg-Porosität der Mörtel der Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,45$ in der Probekörpermitte und im oberflächennahen Bereich im Alter von 28 Tagen	B-7
Bild B-15:	Hg-Porosität der Mörtel der Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,40$ in der Probekörpermitte und im oberflächennahen Bereich im Alter von 28 Tagen	B-7
Bild B-16:	Hg-Porosität der Mörtel der Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ in der Probekörpermitte und im oberflächennahen Bereich im Alter von 28 Tagen	B-7
Bild B-17:	Hg-Porosität der Mörtel der Betone mit $(w/z)_{eq} = 0,30$ in der Probekörpermitte und im oberflächennahen Bereich im Alter von 28 Tagen	B-7
Bild B-18:	CT-Bilder durch den Querschnitt des Bohrkerns aus dem silikastaubhaltigen Beton mS35 oben: im Alter von 28 Tagen; Mitte: nach dem kapillaren Saugen; unten: nach 42 Frost-Tau-Wechsel	B-8
Bild B-19:	Rückstand der Silikastaubsuspension nach MSS-Aufschluss	B-9
Bild B-20:	Rückstand des Leims mS45 nach MSS-Aufschluss 10 Minuten nach Mischende	B-9
Bild B-21:	Rückstand des Leims oS45 nach MSS-Aufschluss im Alter von 28 Tagen	B-9
Bild B-22:	Rückstand des Leims mS45 nach MSS-Aufschluss im Alter von 28 Tagen	B-9

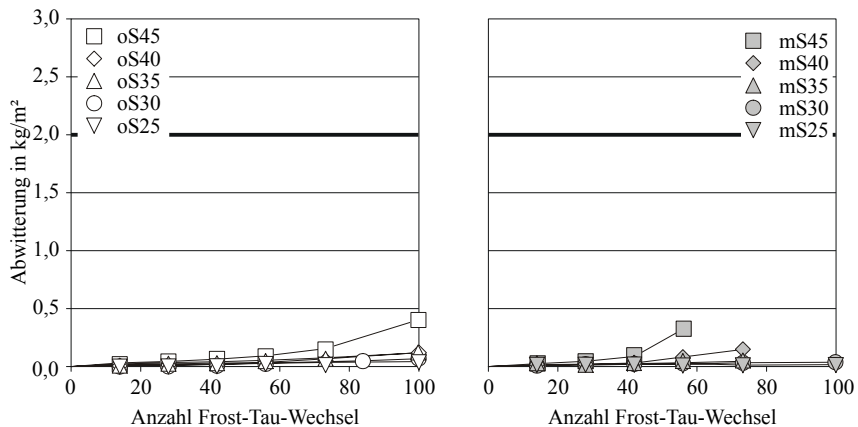


Bild B-1: Abwitterung in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bestimmt mit dem CIF-Verfahren links: Betone ohne Silikastaub; rechts: Betone mit 8 M.-% Silikastaub

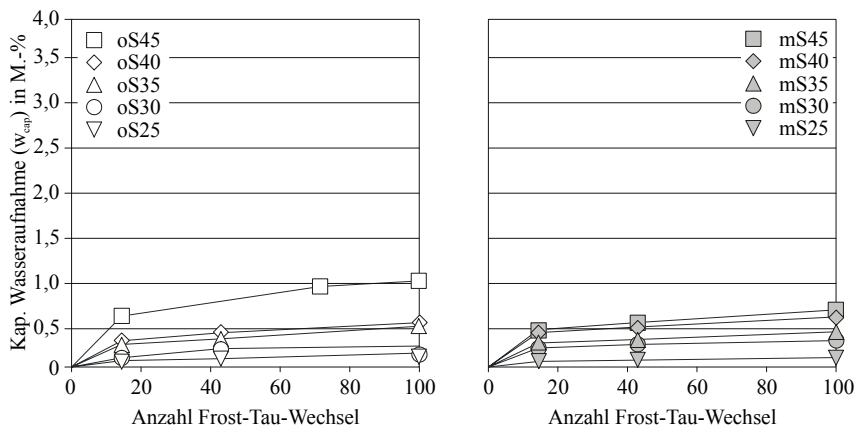


Bild B-2: Kapillare Wasseraufnahme (w_{cap}) in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bestimmt mit dem CIF-Verfahren links: Betone ohne Silikastaub; rechts: Betone mit 8 M.-% Silikastaub

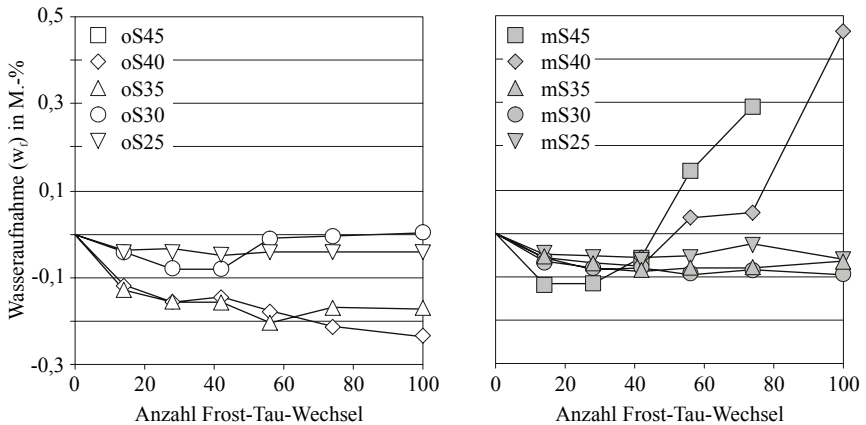


Bild B-3: Wasseraufnahme (w_t) in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bestimmt mit dem Balkenverfahren links: Betone ohne Silikastaub; rechts: Betone mit 8 M.-% Silikastaub

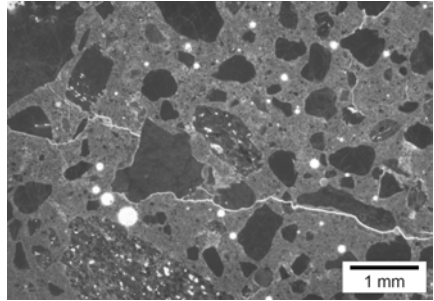
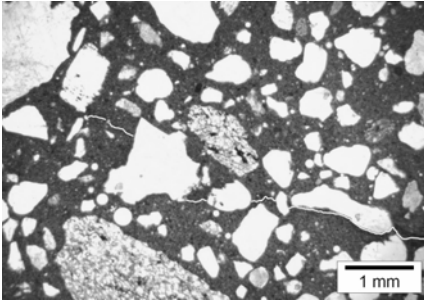


Bild B-4: Gefüge im Kern des Beton mS35 bei RDM ca. 100%

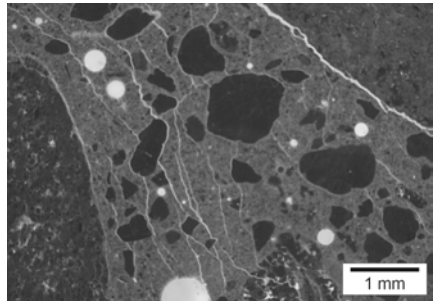
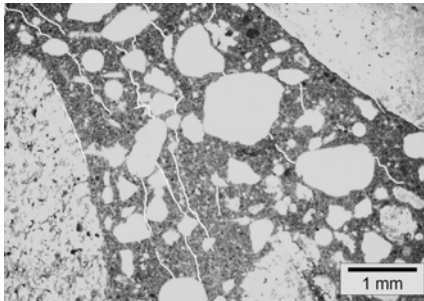


Bild B-5: Gefüge im Kern des Beton mS35 bei RDM ca. 80%

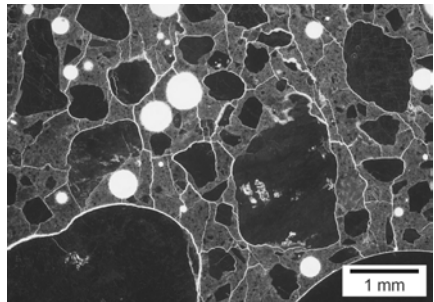
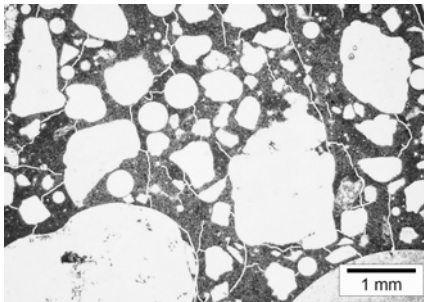


Bild B-6: Gefüge im Kern des Beton mS35 bei RDM ca. 60%

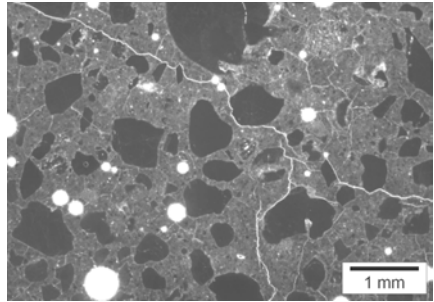
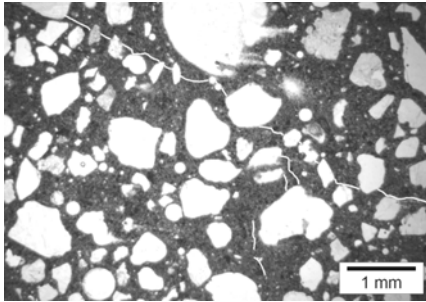


Bild B-7: Gefüge im Kern des Beton mS35/15 bei RDM ca. 100%

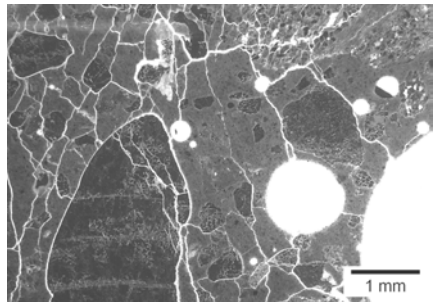
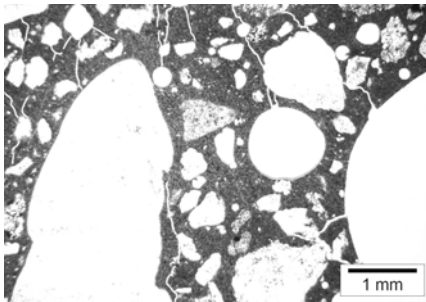


Bild B-8: Gefüge im Kern des Beton mS35/15 bei RDM ca. 80%

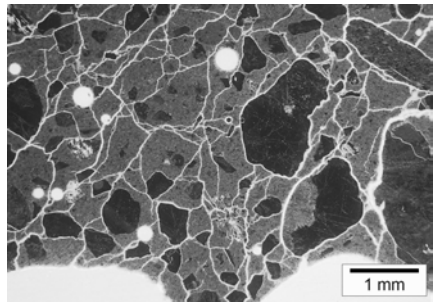
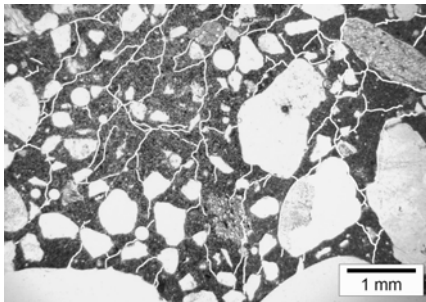


Bild B-9: Gefüge im Kern des Beton mS35/15 bei RDM ca. 60%

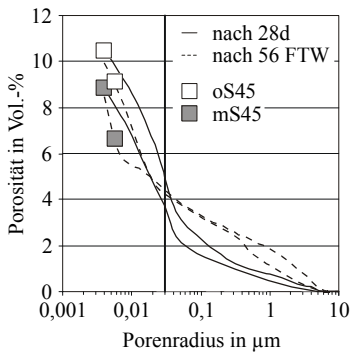


Bild B-10: Porosität der Mörtel mit $(w/z)_{eq} = 0,45$ nach 28tägiger Lagerung und nach 56 Frost-Tau-Wechseln

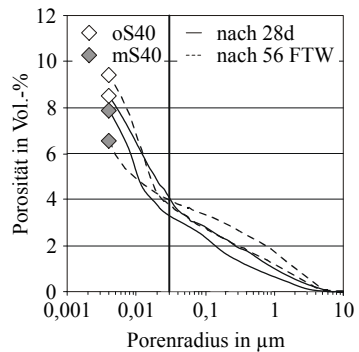


Bild B-11: Porosität der Mörtel mit $(w/z)_{eq} = 0,40$ nach 28tägiger Lagerung und nach 56 Frost-Tau-Wechseln

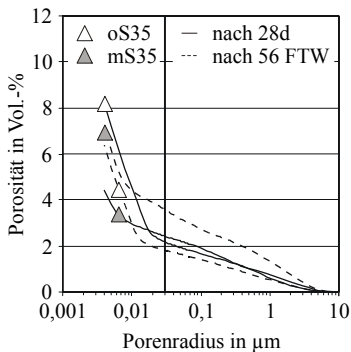


Bild B-12: Porosität der Mörtel mit $(w/z)_{eq} = 0,35$ nach 28tägiger Lagerung und nach 56 Frost-Tau-Wechseln

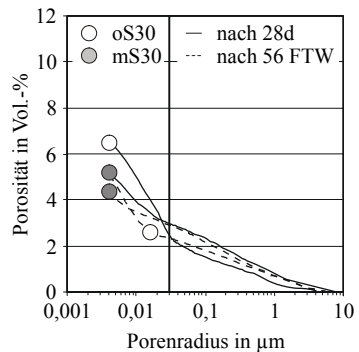


Bild B-13: Porosität der Mörtel mit $(w/z)_{eq} = 0,30$ nach 28tägiger Lagerung und nach 56 Frost-Tau-Wechseln

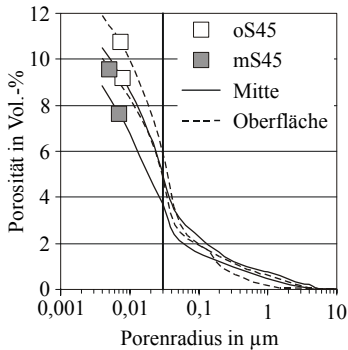


Bild B-14: Hg-Porosität der Mörtel der Betone mit $(w/z)_{\text{eq}} = 0,45$ in der Probekörpermitte und im oberflächennahen Bereich im Alter von 28 Tagen

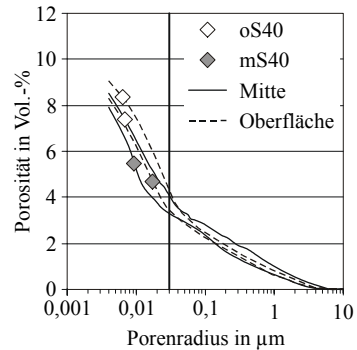


Bild B-15: Hg-Porosität der Mörtel der Betone mit $(w/z)_{\text{eq}} = 0,40$ in der Probekörpermitte und im oberflächennahen Bereich im Alter von 28 Tagen

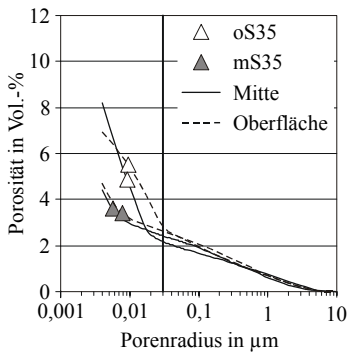


Bild B-16: Hg-Porosität der Mörtel der Betone mit $(w/z)_{\text{eq}} = 0,35$ in der Probekörpermitte und im oberflächennahen Bereich im Alter von 28 Tagen

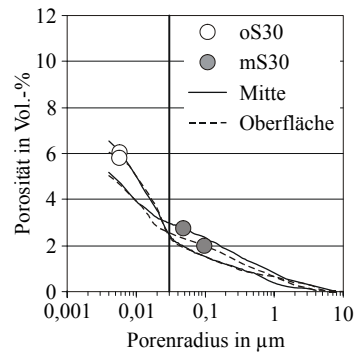


Bild B-17: Hg-Porosität der Mörtel der Betone mit $(w/z)_{\text{eq}} = 0,30$ in der Probekörpermitte und im oberflächennahen Bereich im Alter von 28 Tagen

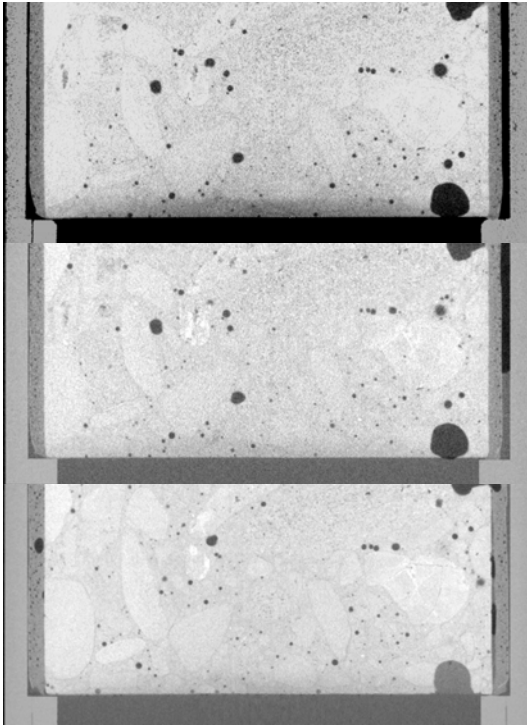


Bild B-18: CT-Bilder durch den Querschnitt des Bohrkerns aus dem silikastaubhaltigen Beton mS35
oben: im Alter von 28 Tagen;
Mitte: nach dem kapillaren Saugen;
unten: nach 42 Frost-Tau-Wechsel

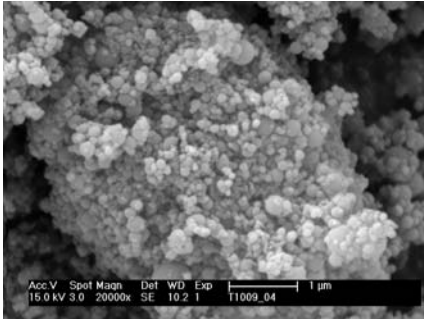


Bild B-19: Rückstand der Silikastaubsuspension nach MSS-Auflschluss

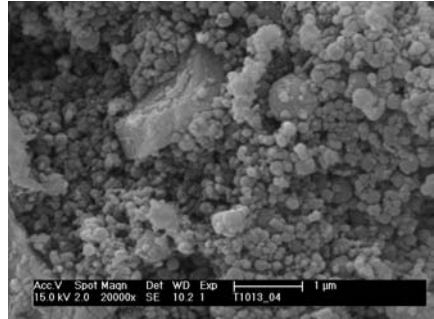


Bild B-20: Rückstand des Leims mS45 nach MSS-Auflschluss 10 Minuten nach Mischende

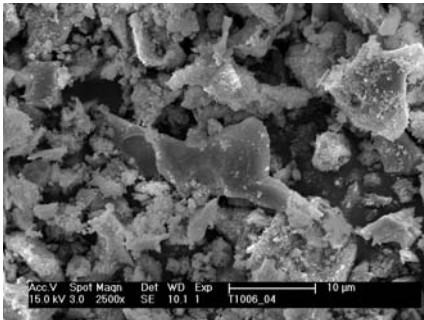


Bild B-21: Rückstand des Leims oS45 nach MSS-Auflschluss im Alter von 28 Tagen

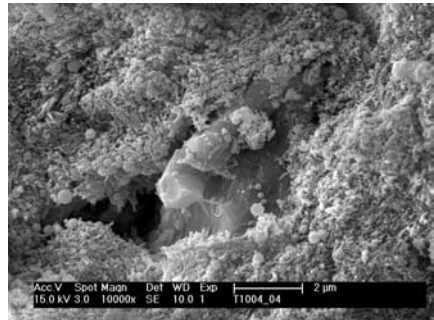


Bild B-22: Rückstand des Leims mS45 nach MSS-Auflschluss im Alter von 28 Tagen

Volkert Feldrappe

Zum Frostwiderstand gefügedichter Betone mit geringen Wasserzementwerten